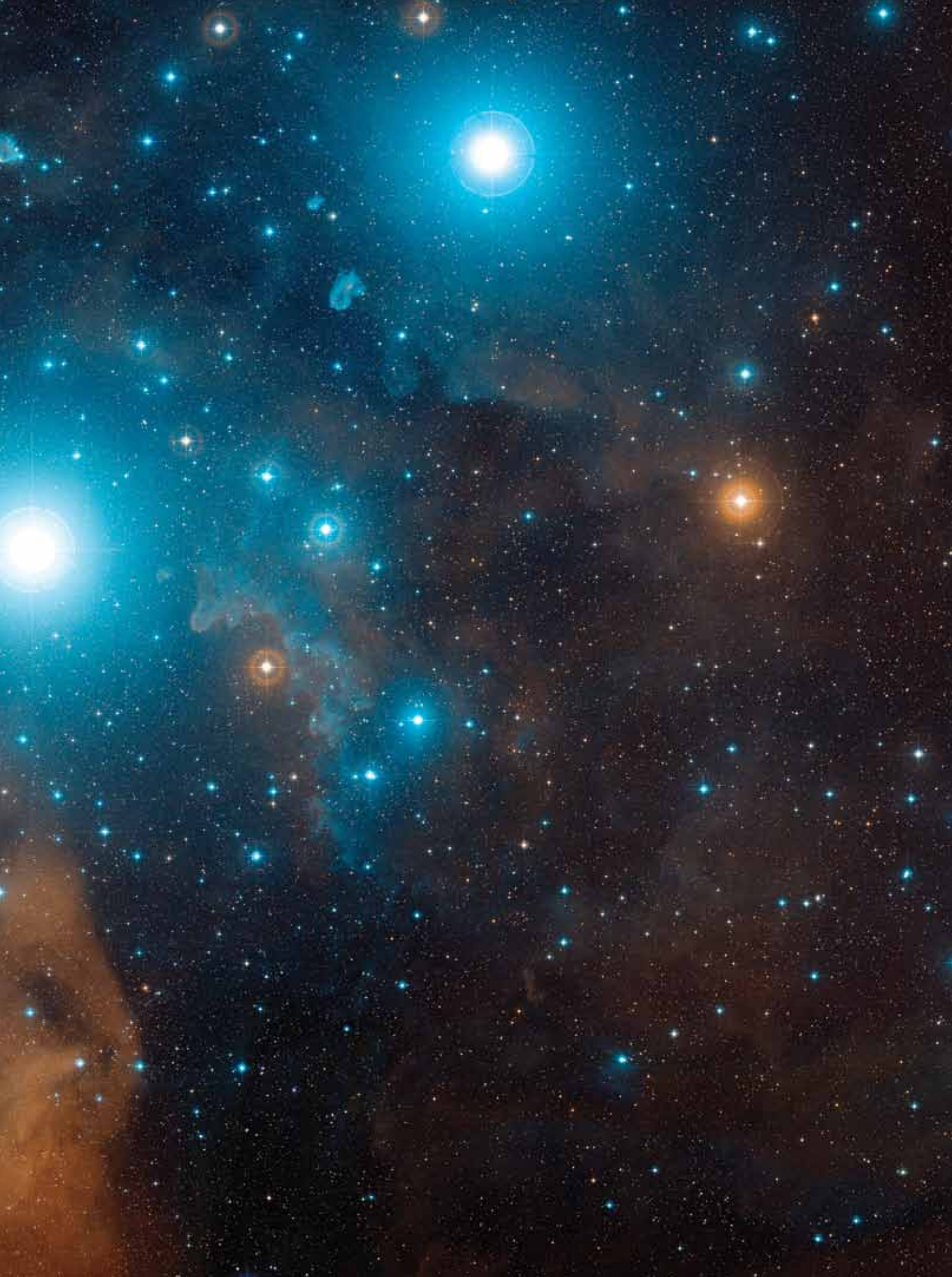


FASCÍNIO DO UNIVERSO









O FASCÍNIO DO UNIVERSO

Editores: Augusto Damineli e João Steiner



Todos os direitos desta edição reservados à:
© Augusto Damineli e João Steiner

Produção gráfica: Odysseus Editora

Revisão: Daniel Seraphim
Revisão final: Pedro Ulsen
Projeto gráfico, capa e diagramação: Vania Vieira

Odysseus Editora Ltda.
R. dos Macunis, 495 – CEP 05444-001 – Tel./fax: (11) 3816-0835
editora@odysseus.com.br – www.odysseus.com.br

ISBN: 9788578760151

Edição: 1
Ano: 2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

O Fascínio do universo / organizadores Augusto Damineli, João Steiner. -- São Paulo : Odysseus Editora, 2010.

1. Astronomia 2. Cosmologia I. Damineli, Augusto. II. Steiner, João.

10-04696

CDD-523.1

Índices para catálogo sistemático:

1. Cosmologia : Astronomia 523.1
2. Universo : Astronomia 523.1

Capa: Imagem da galáxia de Andromeda tomada na luz visível por Robert Gendler, como parte do projeto "From Earth to the Universe" (www.fromearthtotheuniverse.org).

Editores: Augusto Damineli e João Steiner.

Coordenação da Sociedade Astronômica Brasileira: Kepler de Souza Oliveira Filho (coordenador), Beatriz E. Barbuy, João Braga, João E. Steiner, José Williams Santos Vilas Boas, Eduardo Janot-Pacheco (presidente da SAB).

Redação final: João Steiner, Flávio Dieguez, Augusto Damineli e Sylvio Ferraz Mello.

Agradecimentos a Ildeu de Castro Moreira (Departamento de Popularização e Difusão da C&T do Ministério da Ciência e Tecnologia) pelo incentivo à produção deste livro e pelo apoio decisivo ao Ano Internacional da Astronomia 2009.

Financiamento: Projeto CNPq 578802/2008-2 concedido a A. Damineli para ações do Ano Internacional da Astronomia 2009.



O livro em formato PDF está no endereço
www.astro.iag.usp.br/fascinio.pdf

ÍNDICE

Apresentação	7
Cap. 1 - O Universo é um laboratório de Física	9
Cap. 2 - Sistemas planetários	17
Cap. 3 - Exoplanetas e procura de vida fora da Terra	27
Cap. 4 - Estrelas variáveis e o Universo transiente	33
Cap. 5 - Populações estelares	57
Cap. 6 - Galáxias e seus núcleos energéticos	61
Cap. 7 - Estruturas em grande escala do Universo	69
Cap. 8 - Universo, evolução e vida	87
Cap. 9 - Astronomia no Brasil	93



Telescópios SOAR de 4 metros (frente) e Gemini Sul de 8 metros (fundo) no Cerro Pachón (2750 m), Chile, ao pôr do Sol. A parceria nesses telescópios é o marco de uma nova era nas atividades de pesquisa astronômica no Brasil. Além da alta qualidade do sítio, participamos da construção de instrumentos de alta tecnologia. (Crédito: A. Damineli)



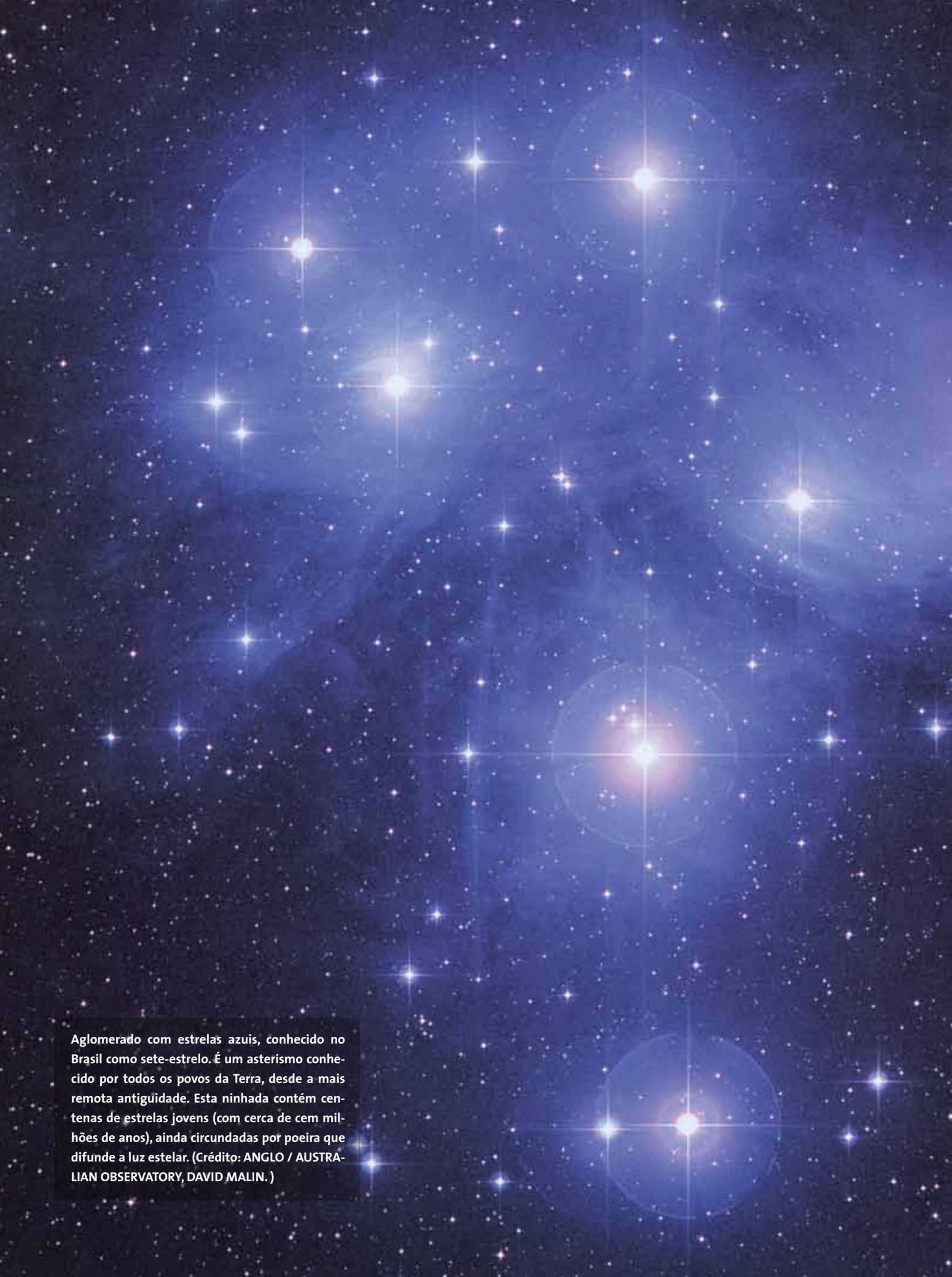
Apresentação

O acesso da população a planetários e observatórios públicos é importante para difundir uma mentalidade científica na sociedade e atrair vocações para a carreira de pesquisa em Astronomia. (Crédito: Polo Astronômico de Foz do Iguaçu – PR)

O ano de 2009 foi nomeado o Ano Internacional da Astronomia pela ONU para comemorar os 400 anos desde que Galileu Galilei apontou sua luneta para o céu e fez descobertas surpreendentes. Entre elas estão quatro luas de Júpiter, as fases de Vênus, as manchas solares, os anéis de Saturno e a descoberta de que a Via Láctea é composta de estrelas. A forma como vemos o universo nunca mais seria a mesma. A luneta passou a ter aperfeiçoamentos importantes, incorporando inovações na óptica, na mecânica e na forma de se analisar a luz por ela captada. A luneta transformou-se em telescópio. No século XX, esses instrumentos foram colocados em órbita terrestre, onde estão livres dos efeitos da atmosfera. Ao mesmo tempo novas faixas do espectro eletromagnético foram desbravadas, permitindo que o universo fosse observado

por novas janelas e criando novas disciplinas, como a radioastronomia, a astronomia de raios X, raios gama, ultravioleta e infravermelho.

No Brasil, as pesquisas em Astronomia têm experimentado um dinamismo crescente. Praticamente sem nenhuma produção até a década de 1960, o Brasil passou a ser um ator relevante no cenário internacional a partir dos anos 1990. A criação dos programas de pós-graduação e do Laboratório Nacional de Astrofísica tiveram papel central nesse desenvolvimento. Graças à maturidade assim atingida, o Brasil passou a ser sócio de grandes projetos internacionais como o Gemini e o SOAR. Novos passos estão sendo planejados para que o país continue a ser ator nessa grande aventura de desvendar os mistérios do universo.



Aglomerado com estrelas azuis, conhecido no Brasil como sete-estrela. É um asterismo conhecido por todos os povos da Terra, desde a mais remota antiguidade. Esta ninhada contém centenas de estrelas jovens (com cerca de cem milhões de anos), ainda circundadas por poeira que difunde a luz estelar. (Crédito: ANGLO / AUSTRALIAN OBSERVATORY, DAVID MALIN.)



Capítulo 1

O Universo é um laboratório de Física

“Quando as Plêiades aparecem no céu é tempo de usar a foice – e o arado, quando se põem” – Hesíodo, poeta grego do século VIII a.C., sobre a constelação das Plêiades.

“Os neutrinos são muito pequenos... Para eles a Terra é só uma bola boba, que eles simplesmente atravessam” – John Updike, poeta norte-americano (1932-2009)

De Hesíodo a Updike, o universo sempre esteve muito perto da civilização. Tem sido usado tanto para agendar o cultivo da Terra, no passado, quanto como fonte de inspiração para os escritores, em todas as épocas. O mistério das estrelas mexeu profundamente com a imaginação dos povos e converteu-se em matéria-prima para o desenvolvimento da filosofia, das religiões, da poesia e da própria ciência, que ajudou a produzir as coisas práticas, que trouxeram conforto, qualidade de vida, cultura e desenvolvimento econômico e social. Observar o céu e anotar os movimentos das estrelas e dos planetas é uma prática milenar e continua na fronteira do conhecimento e da cultura contemporânea.

No início desse novo milênio, as ciências do universo estão prontas para dar um salto como poucos na história da civilização, e os próximos anos deverão trazer as estrelas e as galáxias para muito mais perto da sociedade. A Astronomia desdobrou-se em Astrofísica, Cosmologia, Astrobiologia, Planetologia e muitas outras especializações. Não é por acaso: a divisão de trabalho foi necessária para dar conta desse imenso laboratório que nos



Galáxias que atropelam umas às outras – apesar das distâncias incríveis que as separam – revelam um Universo vivo, em transformação permanente. Estas duas galáxias espirais em colisão, chamadas de Antenas, estão em processo de fusão. Nossa Galáxia está em colisão com diversas galáxias menores e em cerca de dois bilhões de anos colidirá com Andrômeda, gerando um panorama muito parecido com as Antenas. As estrelas não colidem entre si durante o choque, mas a agitação do gás gera grandes ninhadas de novas estrelas, entre elas as azuis, de grande massa. (Crédito: NASA/ESA/ HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA)-ESA/HUBBLE COLLABORATION.)

oferece uma oportunidade única: testar ideias que jamais poderiam ser submetidas a experiências aqui na Terra. No céu, não há limite para a imaginação.

Os telescópios atualmente fotografam estrelas e galáxias aos milhares de uma só vez. Já não têm apenas lentes de aumento ou espelhos, mas também, e cada vez mais, circuitos eletrônicos que absorvem a luz, registram sua intensidade, decompõem-na de formas variadas. Assim, extraem delas a melhor informação possível. Os computadores

encarregam-se de recriar as imagens captadas. Eles podem torná-las mais nítidas, filtrar e recombina suas cores para destacar detalhes-chave difíceis de identificar diretamente nas fotografias.

Dezenas de telescópios, nas últimas décadas, foram instalados no espaço, onde a imagem é mais limpa por não haver ar para borrá-la. As imagens ganham uma nitidez excepcional – a ponto de se poder acompanhar o clima dos planetas mais próximos, como Marte e Júpiter, quase como se acom-

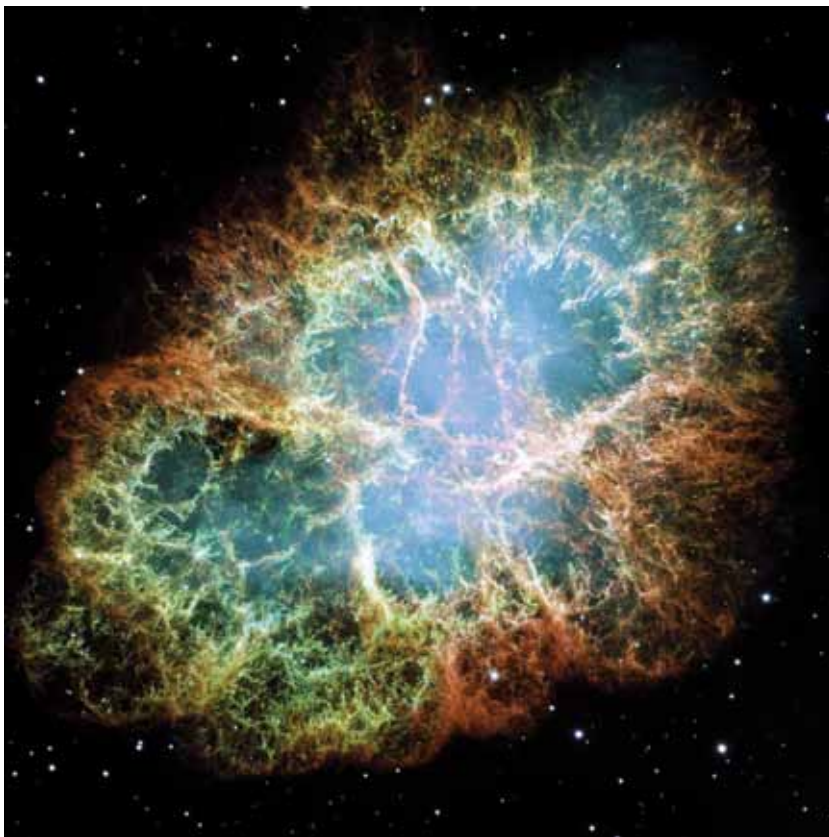
panha o clima aqui na Terra. Ainda mais impressionantes são os espelhos inteligentes, inventados para evitar o custo de lançar um grande instrumento ao espaço: com a ajuda de um raio laser eles podem examinar as condições instantâneas do ar. Essas informações alimentam um computador, que manda deformar o espelho captador de luz. Com isso, corrigem-se os borrões criados pela atmosfera. Além da luz comum, com suas cores tradicionais, visíveis ao olho humano, existem telescópios que enxergam raios X, luz infravermelha, ondas de rádio, micro-ondas e outras formas de luz invisíveis.

Essa quantidade inimaginável de informação já se tornou rotina – como uma máquina de produzir conhecimento. Ela flui pela comunidade internacional dos astrônomos e os ajuda a contar as estrelas e agrupá-las em populações distintas. Também pode-se estimar a idade das galáxias em que as estrelas estão. As próprias galáxias – contendo centenas de bilhões de estrelas cada uma – podem

ser classificadas em tipos distintos, como se fossem tribos cósmicas.

E assim como as estrelas formam galáxias, estas também se ligam umas às outras para formar objetos astronômicos ainda maiores. São os aglomerados e superaglomerados de galáxias – estes últimos tão grandes que sua história se confunde com a história do Universo (por isso eles podem, num futuro próximo, ajudar a desvendar a evolução e a origem do cosmo, há quase 14 bilhões de anos).

As estrelas não são eternas, como se pensava até o século XIX. Elas nascem, evoluem e morrem, e durante a vida fabricam átomos pesados que não existiam no Universo jovem, quando a química do Cosmo resumia-se aos dois átomos mais simples, o hidrogênio e o hélio. Essa atividade não para porque, ao explodir e morrer, as estrelas de grande massa espalham seus restos pelo espaço, enriquecendo o ambiente cósmico com carbono, oxigênio, cálcio, ferro e os outros átomos conhecidos.



A supernova do Caranguejo foi vista em pleno dia, em 1054, pelos chineses. Seus gases se expandem a velocidades superiores a 10.000 Km/s e em seu centro se observa um pulsar – estrela de nêutrons com fortes campos magnéticos – que gira 33 vezes por segundo. (Crédito: NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU))

Desses restos nascem outras estrelas, que enriquecem ainda mais de átomos o espaço. Ao mesmo tempo, os “caroços” das estrelas que explodiram também se transformam em astros, mas diferentes das estrelas comuns. São corpos inimagináveis, como as anãs brancas, as estrelas de nêutrons e os buracos negros. Esses personagens são o caroço central das estrelas mortas, que a detonação esmaga e converte em corpos compactados, duríssimos.

O Cosmo, portanto, não é um museu de objetos inalcançáveis. Está vivo,

em transformação permanente. E é para dar conta desse ambiente mutante que os telescópios começaram a incorporar a dimensão do tempo aos seus dados básicos. Não é simples como parece: como as estrelas e as galáxias vivem bilhões de anos, seus ciclos de vida são imensos e suas explosões mortais são extremamente raras. Mas, quando se observam grandes fatias do céu ao mesmo tempo, é possível flagrar diferentes astros passando por fases distintas do ciclo vital.

Até as mais raras detonações tornam-se frequentes e podem ser vistas o

tempo todo, iluminando algum ponto do céu. Outros telescópios podem então ser direcionados para lá, para acompanhar os detalhes do espetáculo. E é um espetáculo indescritível, já que as grandes estrelas, ao sucumbir, superam galáxias inteiras em brilho. Seus clarões podem ser vistos por toda a extensão do Universo por alguns dias. Esse tipo de explosão é chamado de supernova.

Como podem ser vistas de muito longe, as supernovas acabaram se tornando muito úteis como ferramenta para investigar o próprio Universo. Foi por meio delas que, em 1998, descobriu-se que o Universo está expandindo cada vez mais depressa, levantando a hipótese de que existe algum tipo de força desconhecida, aparentemente dotada de antigravidade.

Desde então esse novo habitante cósmico vem sendo chamado de energia escura, e a corrida para identificá-lo tornou-se um dos tópicos mais excitantes da Astronomia. Nessa busca, as supernovas funcionam como um velocímetro:

seu clarão dá aos astrônomos um meio preciso de calcular a taxa de expansão do Universo naquele ponto.

No espaço, o que está longe também está no passado, já que a luz demora para chegar aos telescópios e, portanto, aos nossos olhos. Assim, as supernovas mais distantes podem mostrar como eram quando o Cosmo começou a se acelerar e se a aceleração está ou não mudando ao longo do tempo.

A partir daí, pode-se especular com mais precisão sobre a natureza exata da energia escura. Que tipo de energia será essa? O que ela pode nos ensinar sobre os átomos e suas partículas? Os cálculos mostram que a energia escura – seja lá o que for – é muito mais comum que a matéria atômica que forma as estrelas e galáxias: mais de 70% da energia total do Universo está na forma de energia escura. Para cada quilograma de matéria tradicional, existem 10 quilogramas de energia escura correspondente.

Essa matéria desconhecida e inesperada representa uma revolução

uma celebração global da Astronomia e suas contribuições para o conhecimento humano

no conhecimento do Universo – tão importante quanto a descoberta de que a Terra não é o centro do Universo, como se pensava até 500 anos atrás. A energia escura certamente tem papel decisivo sobre o destino final do Cosmo. Mas não só isso: pode ter influência essencial sobre a sua arquitetura atual, ajudando a moldar a imensa teia de galáxias que vemos nas maiores escalas de espaço e tempo. Há ainda a matéria escura, que é cerca de seis vezes mais comum do que a matéria luminosa – que é a que podemos ver. Também não sabemos do que é feita a matéria escura.

Esse momento de entusiasmo e fascínio renovado pelo antigo mistério das estrelas coincide com os quatro séculos da obra do cientista italiano Galileu Galilei (1564-1642), que foi um dos primeiros a examinar o céu com ajuda de um telescópio – e a desenhar, à mão, o que tinha visto na Lua, no Sol, em Júpiter e em Saturno, espantando a sociedade de sua época. Esse marco foi comemorado pelos eventos do Ano Internacional da Astro-

nomia, em 2009, uma celebração global da Astronomia e suas contribuições para o conhecimento humano. Uma das metas do Ano Internacional foi impulsionar fortemente a educação, tentar envolver o máximo possível o público e engajar os jovens na ciência, por meio de atividades dos mais diversos tipos – nas cidades, em cada país e também globalmente.

Este livro é parte desse movimento e seu objetivo é descrever em linguagem simples, mas com detalhes, o que se sabe sobre alguns aspectos do Universo e como eles são estudados no Brasil. Além dos fatos científicos, ele visa também a destacar o papel cultural e econômico da Astronomia, como inspiração para o desenvolvimento de muitos outros campos da ciência, especialmente dentro da Física e da Matemática.

Mais amplamente, a Astronomia forneceu e continua a fornecer ferramentas conceituais decisivas para a astronáutica, para a análise da luz, para a compreensão da energia nuclear, para a procura de partículas atômicas. Em ter-

uma das mais refinadas expressões da inteligência humana

mos do desenvolvimento de materiais e tecnologias, ela manteve-se na fronteira da óptica, da mecânica de precisão e da automação. E, acima de tudo, teve e tem profundo impacto no conhecimento, e é uma das mais refinadas expressões da inteligência humana.

Há um século, mal tínhamos ideia da existência de nossa própria galáxia, a Via Láctea. Hoje sabemos que existem centenas de bilhões delas. Neste início de milênio, abre-se a perspectiva concreta de detectar planetas similares à Terra e, possivelmente, vida em outros planetas. E caso a vida exista fora da Terra, investigar mais profundamente a sua origem. Qualquer que seja a resposta, o impacto no pensamento humano será um marco na história da civilização.



O sistema solar é composto por uma estrela, oito planetas clássicos, 172 luas, um grande número de planetas anões como Plutão, um número incalculável de asteroides e dezenas de bilhões de cometas.

(Crédito: A. Damineli e Studio Ponto 2D)

Capítulo 2

Sistemas planetários

A teoria da gravidade do físico inglês Isaac Newton (1643-1727) foi deduzida diretamente das leis de Johannes Kepler (1571-1630), que diziam como os planetas se moviam em torno do Sol. A Astronomia Dinâmica é a mais antiga disciplina da Astronomia Física. Apareceu pela primeira vez no livro *Princípios Matemáticos*, de Newton, em que a teoria da gravitação de Newton foi aplicada ao movimento dos planetas e seus satélites, assim como dos cometas e asteroides.

O matemático francês Pierre-Simon Laplace (1749-1827) foi quem deu o nome de Mecânica Celeste a esse conjunto de aplicações da teoria da gravidade. Nos séculos seguintes a Astronomia Dinâmica ampliou-se. Passou a abranger os movimentos das estrelas dentro das galáxias e em sistemas com várias estrelas ligadas pela gravitação, como os aglomerados de estrelas.

Desde os anos 1950, passou-se ao estudo astrodinâmico do movimento de sondas e satélites artificiais, de um lado, e, de outro, o estudo dos sistemas plane-

tários extrassolares, ou seja, orbitando outras estrelas. Paralelamente, o conjunto de problemas matemáticos que surge da aplicação das equações de Newton a sistemas de vários corpos passou a constituir uma especialidade autônoma dentro da Matemática.

O uso do nome Astronomia Dinâmica e de outros – nos mais variados contextos, nos quase 400 anos desde o trabalho de Newton – não foi feito de maneira uniforme e sem ambiguidades. Neste capítulo vamos tentar eliminar essas dúvidas. Este capítulo trata da parte da Astronomia que estuda os movimentos dos corpos do sistema solar. É importante frisar que não é possível isolar o contexto mais amplo da Astronomia Dinâmica, que inclui a Mecânica Celeste dos matemáticos e a Astrodinâmica dos engenheiros espaciais.

Afinal de contas, não há diferença entre estas duas coisas: estudar o movimento de um asteroide, em órbita aparentemente estável do cinturão de asteroides, para uma órbita de colisão com a

Terra ou a transferência de um objeto de uma órbita ao redor da Terra a uma outra, que o leve, por exemplo, até as proximidades da Lua ou de Marte.

No final do século XX, os asteroides assumiram um papel de destaque na Astronomia Dinâmica. A razão principal é que hoje se conhecem cerca de 400 mil asteroides movendo-se entre Júpiter e os planetas interiores (Marte, Terra, Vênus e Mercúrio). Eles são monitorados regularmente, e essa riqueza de informações permite equacionar muitos problemas com precisão. A órbita de um asteroide é caracterizada por vários parâmetros – indicadores do seu tamanho, forma ou orientação no espaço. Essas características não são fixas. Variam de acordo com a ação gravitacional conjunta do Sol, de Júpiter e de outros planetas.

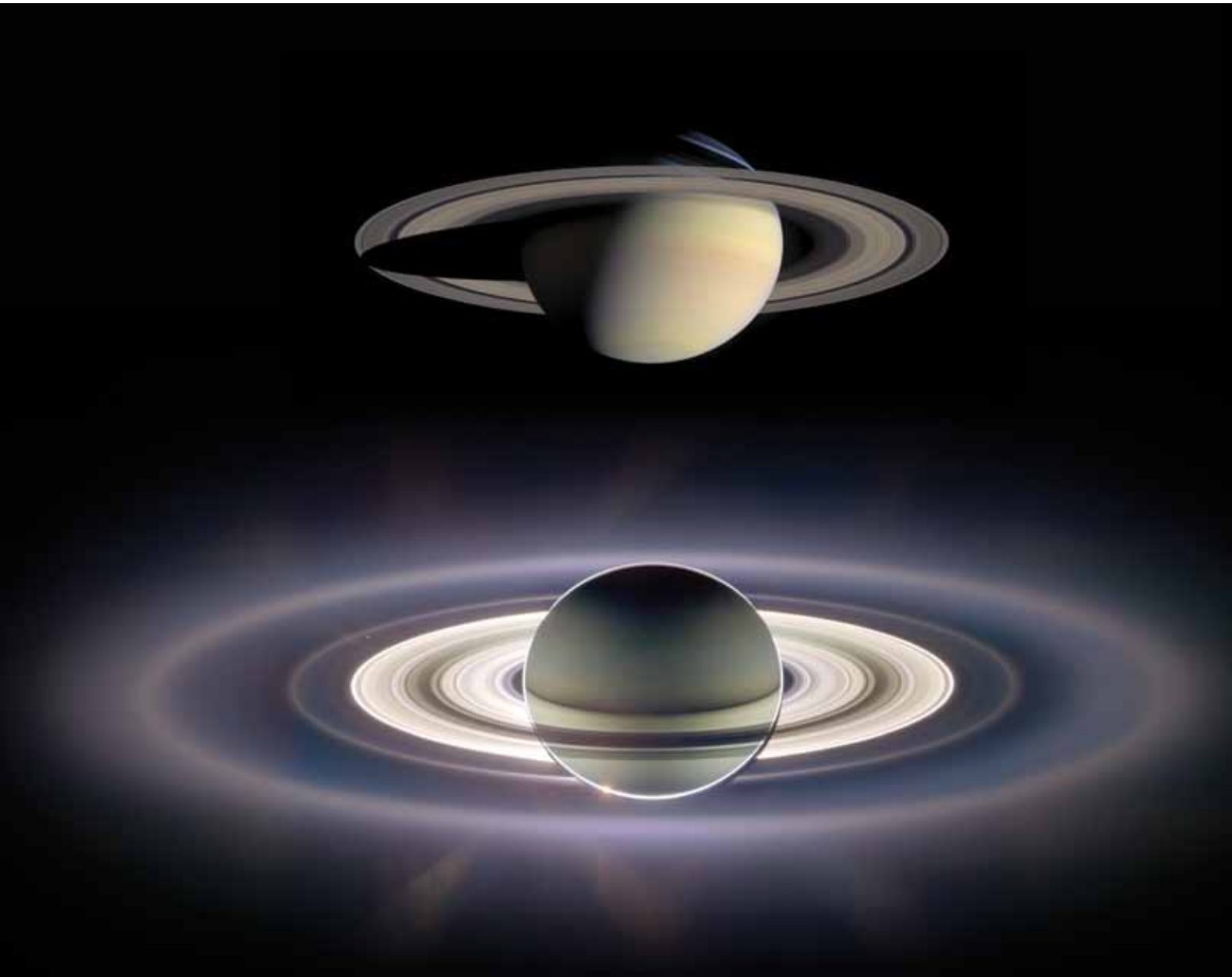
As leis que regem essas variações foram determinadas já no século XIX. Elas mostram que a órbita de um asteroide tem “elementos próprios”, que não mudam muito e servem como pistas sobre o seu passado. São traçadores: servem para

identificar famílias ou tipos de asteroides, e cada família, em geral, é composta pelos mesmos minerais.

Uma família que tem ocupado astrônomos brasileiros é aquela a que pertence o asteroide Vesta. Ela é interessante para ilustrar o que acontece depois que se faz a caracterização dinâmica de uma família. Nesse caso, a caracterização é bem completa: os maiores asteroides dessa família foram observados e mostrou-se que continham os mesmos minerais. Depois, comparando-se com minerais terrestres, verificou-se que eram basálticos. Mais ainda: alguns dos meteoritos que caem na Terra têm composição similar, o que indica um parentesco entre os meteoritos e a família Vesta.

Para completar, imagens de Vesta obtidas pelo telescópio espacial Hubble mostraram uma imensa cratera em sua superfície, a provável cicatriz de um impacto gigantesco no passado. Essa possível colisão arremessou grande quantidade de fragmentos de Vesta para o espaço, o que pode ter dado origem a asteroides

Saturno visto de frente e de costas. Quando visto contra a luz do Sol, Saturno revela anéis imensos que eram desconhecidos até há pouco tempo. Eles são feitos de poeira fina, que resplandece ao ser olhada contra a luz, da mesma forma que insetos e poeira em suspensão no ar brilham quando contemplamos um pôr do sol. (Crédito: NASA Cassini e NASA/JPL/SSI)



menores e meteoritos (nome que se dá a um objeto celeste quando cai na Terra).

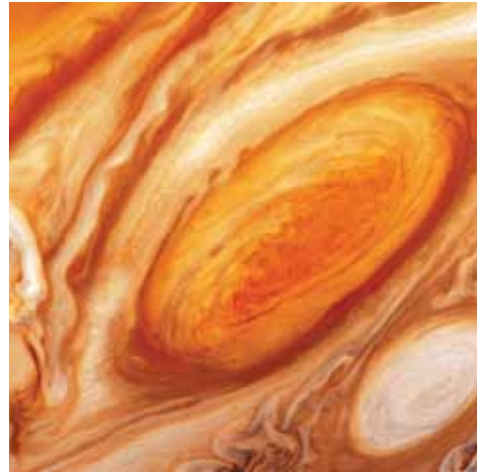
Ainda há muitos fatos que precisam ser estudados. Primeiro: os asteroides resultantes da fragmentação de Vesta não têm órbita tão perto da órbita de Vesta, como deveriam. Segundo: qual teria sido o caminho dos pequenos fragmentos (meteoroides) que caíram na Terra? A resposta não é simples e envolve dois efeitos. Um é a ação gravitacional conjunta do Sol, de Júpiter e dos demais planetas. Nos últimos 30 anos viu-se que essa ação está ligada a zonas de movimentos caóticas no cinturão de asteroides.

As mais fracas modificam a forma da órbita do asteroide, que pode se tornar muito mais longa do que a órbita original. Nas zonas mais fortes, esse efeito pode fazer com que o asteroide se aproxime de Marte, Terra, Vênus ou Mercúrio, e pode haver colisões com esses planetas. Dentre os asteroides conhecidos, cerca de seis mil têm órbitas que se aproximam perigosamente da Terra, de tempos em tempos.

Além dos asteroides, situados entre Júpiter e Marte, existe um grande grupo de objetos que estão além da órbita de Netuno. Eles não têm as mesmas características físicas dos asteroides, que são em geral rochosos. Os objetos mais distantes, como os cometas, contêm diversos tipos de gelo: de água, de carbono, de amônia etc. São restos da nuvem de gás e poeira primitiva, que também deu origem aos grandes planetas.

Mas os cometas e outros objetos relativamente pequenos e distantes acabaram sendo expulsos para longe do Sol pela própria ação gravitacional dos planetas, enquanto estes se formavam. Uma região de grande concentração desses corpos é o chamado cinturão de Kuiper, proposto por Gerard Peter Kuiper (1905-1973) em 1951. Desde a década passada descobriu-se que ali se move um grande número de objetos em órbitas que não são como as dos planetas, ou seja, quase circulares e planas.

Em vez disso, são elípticas, muito alongadas e com grandes inclinações



Jupiter: Imagens do maior planeta do Sistema Solar obtidas (esquerda) através de um telescópio em solo com óptica adaptativa e (direita) pela nave espacial Voyager. A visão impressionante destaca a camada mais alta da atmosfera e deixa ver detalhes de apenas 300 quilômetros – compare com o diâmetro do planeta: 133.000 km. (créditos: TRAVIS RECTOR (U. ALASKA ANCHORAGE), CHAD TRUJILLO AND THE GEMINI ALTAIR TEAM, NOAO / AURA / NSF E JPL / NASA)

em relação ao plano dos planetas. Plutão faz parte desse cinturão. Existe um esforço para explicar a configuração orbital desses objetos, bem como a distribuição de suas cores e tamanhos. Os modelos dinâmicos apontam para processos que tiveram lugar nos primórdios de formação e evolução do Sistema Solar, há mais de quatro bilhões de anos. O descobrimento de novos objetos pode ajudar a decifrar esse enigma e levar a uma compreensão mais completa da evolução do Sistema Solar.

Uma teoria atual afirma que os planetas gigantes, nas fases mais avançadas de sua formação, interagiram fortemente com corpos minúsculos – chamados planetésimos – que restavam no disco de gás e poeira do qual nasceu o Sistema Solar. Como resultado da interação, os planetésimos foram expulsos da

região dos grandes planetas. Uma das mais importantes leis da Mecânica é a da ação e reação. Se A empurra B, A é empurrado por B na direção contrária. Portanto, se os grandes planetas empurraram os planetésimos, também foram empurrados por eles.

Apesar da diferença de tamanho, os planetas eram poucos e, os planetésimos, zilhões. O número é incalculável! De empurrãozinho em empurrãozinho, os planetésimos deslocaram os planetas gigantes para as posições que ocupam hoje. Por exemplo: de acordo com a teoria, Netuno já esteve mais perto do Sol do que Urano, e não o contrário, como hoje.

Devido às interações com os planetésimos, eles trocaram de posição. Hoje, além de Netuno, encontram-se os planetas anões Plutão e Éris, e uma infinidade de pequenos corpos formando



O asteroide Ida e sua lua Dactil. No sistema solar existem 172 luas, 61 delas no gigante Júpiter. Mesmo um asteroide pequeno como Ida é orbitado por uma lua – pequeno ponto à direita. O asteroide rochoso mostra marcas de colisões com milhares de corpos menores. (Crédito: NASA/JPL/Galileo)

o cinturão de Kuiper. Essa teoria, que é chamada de modelo de Nice, foi desenvolvida com a participação de astrônomos brasileiros.

Os satélites, ou luas, dos planetas são também objetos surpreendentes do Sistema Solar. O número de satélites conhecidos aumenta mês a mês. Hoje já são mais de 165. A Astronomia Dinâmica ocupa-se dos satélites de maneiras distintas. Os grandes são formados nas vizinhanças dos planetas, e os pequenos estão mais distantes: presumivelmente foram capturados pelos planetas quando já estavam formados.

Os dois grupos apresentam problemas muito distintos que são tratados de maneiras distintas. Os grandes satélites têm sua evolução regulada pela atração do planeta principal, do Sol e dos demais grandes satélites. Além disso, a interação gravitacional do satélite com o seu planeta difere da verificada nos problemas que discutimos até agora porque a proximidade entre satélite e planeta faz com que ocorram marés, tanto em um

Cometa McNaught

Os cometas são restos da formação do sistema solar, que não foram aglutinados pelos planetas e pelo Sol. Logo após a formação dos grandes planetas (Júpiter e Saturno) eles foram “estilinizados” para longe, formando a nuvem de Oort. Ocasionalmente, algum desses “icebergs” despenca em direção ao Sol, estendendo sua bela cauda com milhões de quilômetros de comprimento. A maior parte da água que temos na Terra foi trazida por cometas. (Crédito: ESO/Sebastian Deiries)



quanto em outro. O exemplo que todos conhecem é a maré causada pela ação da Lua sobre a Terra.

O fenômeno das marés é bem conhecido por sua importância geofísica. O calor que as marés liberam no interior dos corpos pode provocar movimentos tectônicos e vulcanismo. O exemplo mais fantástico são os vulcões de Io e seus grandes derrames de enxofre, resultantes do grande calor gerado no interior daquele satélite devido à atração gravitacional de Júpiter. Mas aqui entra a Física para dizer que esse calor não pode estar sendo gerado a partir do nada.

Se há calor sendo gerado, isto é, se energia está sendo perdida sob a forma de calor, essa energia tem que ter uma fonte, e essa fonte é a energia do movimento dos corpos. No caso do sistema Terra-Lua, o grande estoque de energia é a rotação da Terra, que vem se tornando,

gradativamente, mais lenta. Essa variação é medida. Para manter os relógios acertados com o ritmo da Terra e dar conta do fato de que a Terra está girando cada vez mais lentamente, com alguma frequência introduzem-se segundos intercalares.

As consequências do fenômeno das marés no movimento dos satélites têm sido um dos temas estudados pelos astrônomos brasileiros e devem continuar a ser pelos próximos anos, principalmente no caso dos satélites de Saturno (e também de planetas extrassolares). Os estudos realizados são mais completos do que mencionamos acima, pois, além do balanço de energia, considera-se também a conservação do momento angular, que provoca a expansão das órbitas de muitos satélites.

O melhor conhecimento da evolução das órbitas é fundamental para que se possa ter um melhor

Asteroides também podem ter satélites

conhecimento da geração de energia no interior de satélites com crosta de gelo, como Europa e Titã, onde se presume que existam espessos lençóis de água em forma líquida – oceanos interiores – capazes de abrigar formas extremas de vida. Outros satélites planetários também apresentam fenômenos que, para serem explicados, é necessário um melhor conhecimento das questões ligadas à origem de suas manifestações térmicas.

O fenômeno mais popular neste momento são os jatos de vapor de Encélado (satélite de Saturno) e a modelagem recente da sua superfície. As fontes de calor que propiciam esses fenômenos não são conhecidas. As pesquisas atuais procuram, usando técnicas de dinâmica não linear, mapear ressonâncias secundárias associadas ao movimento de Dione (outro satélite de Saturno), cuja travessia poderia alterar a órbita de Encélado de modo a aumentar a geração de energia térmica pelas marés em seu interior.

Os satélites planetários mais externos, em geral pequenos, são exemplos de um paradigma clássico: o problema restrito dos três corpos. Esse problema trata do movimento de uma partícula de massa desprezível – o satélite – sob a ação gravitacional de dois corpos maiores – o planeta e o Sol. As órbitas desses satélites são muito diferentes das dos demais.

Enquanto os satélites internos estão em geral em órbitas quase circulares situadas no plano equatorial do planeta, os satélites mais externos têm órbitas de grande elipticidade e situadas em planos bastante inclinados. Muitos, inclusive, movem-se em uma direção contrária ao movimento rotacional do planeta. Não parecem haver se formado nas órbitas em que se encontram. Parecem antes corpos formados em outras regiões do Sistema Solar.

Asteroides também podem ter satélites. O primeiro deles foi detectado pela sonda espacial Galileo. Até o momento quase cem deles já foram iden-

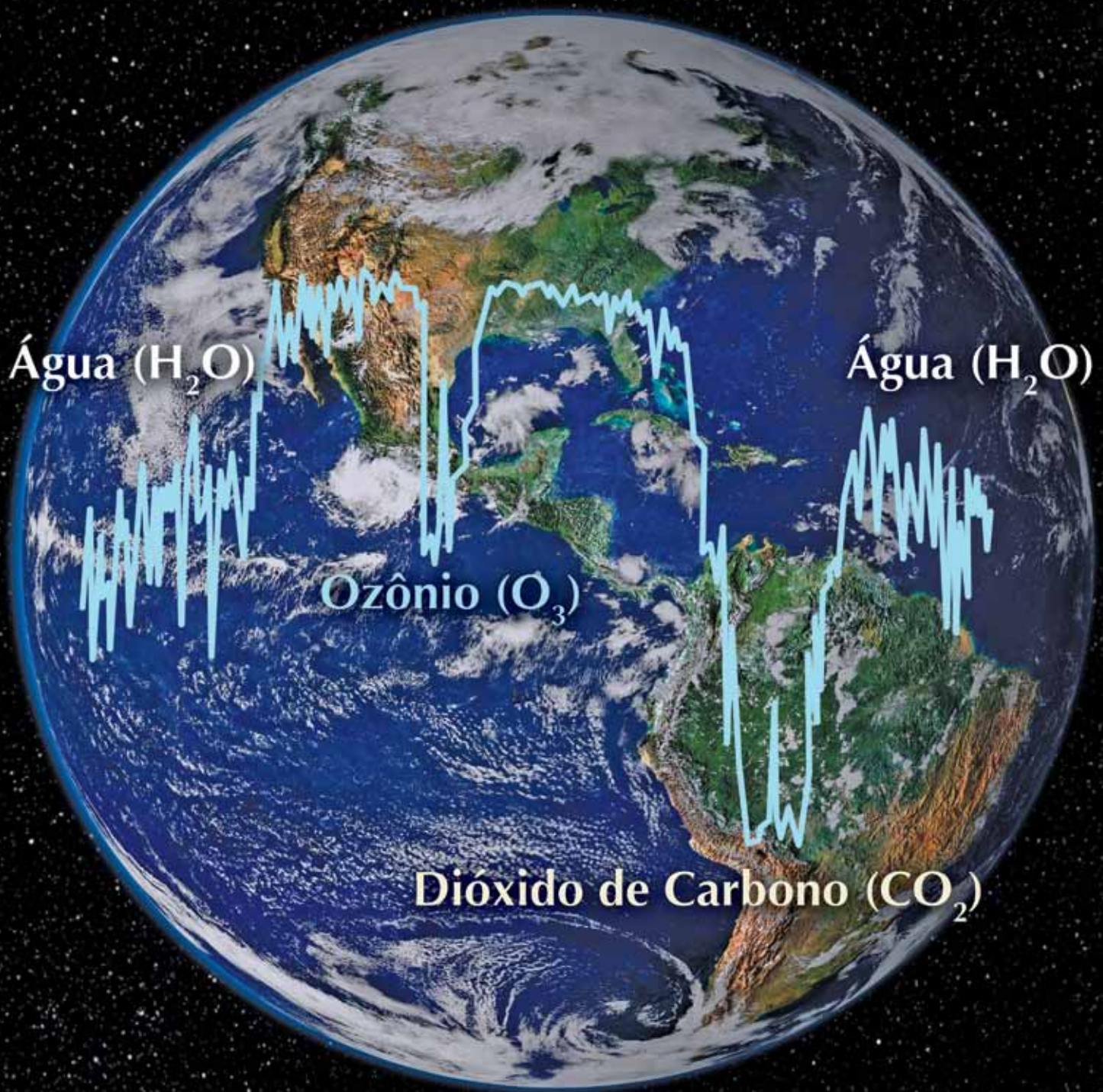


Nebulosa com formação de estrelas contendo a hipergigante eta Carinae, no centro. (Crédito: Gilberto Jardineiro - Astro Clube Cunha)

tificados, e o uso de óptica adaptativa e de grandes telescópios deve revelar muitos outros. Essas descobertas levantam questões sobre a origem e a evolução desses objetos.

Finalmente, os anéis, que estão entre os corpos mais bonitos do Sistema Solar: os de Saturno, que são conhecidos desde a época de Galileu, ainda são estudados. Um ponto alto desses estudos foram os dados obtidos pelas sondas Voyager, em 1980-81. Mais recentemente, ampliaram-se as informações sobre os anéis com a ajuda da sonda Cassini, em 2004. Essas imagens têm permitido inúmeras descobertas, tais como a morfolo-

gia dos anéis e o tamanho das partículas que os formam, de grãos de poeira a rochas com alguns metros.



Camada de ozônio: assinatura de atividade biológica aeróbica. Este é um dos sinais mais inequívocos de atividade biológica, pois não existe nenhum outro processo que possa manter uma importante fração de oxigênio na atmosfera.

Capítulo 3

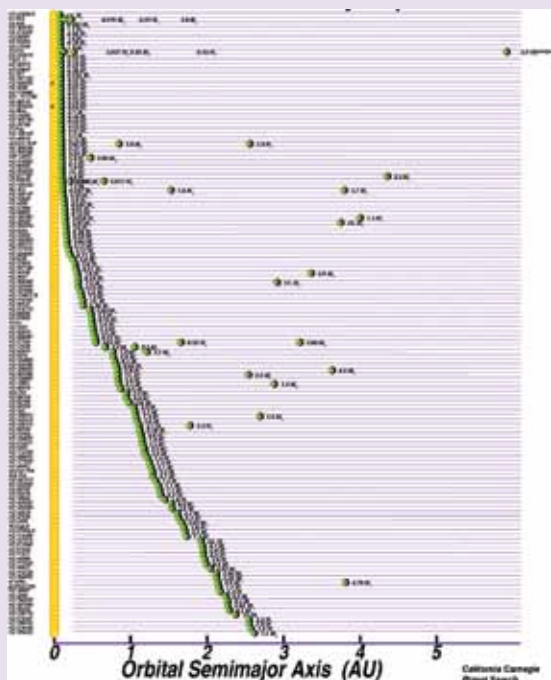
Exoplanetas e a procura de vida fora da Terra

“Estamos sós no Universo?” Essa questão vem ecoando no vazio através dos tempos. Esse vazio foi povoado de fantasias de alienígenas visitando a Terra. Alguns radioastrônomos desenvolveram detectores fantásticos capazes de monitorar simultaneamente milhões de sinais, para captá-los à distância. Mas nada até agora! Isso não quer dizer necessariamente que não exista vida fora da Terra. A pergunta “tem alguém aí?” parece óbvia, mas pode ficar sem resposta por uma série enorme de motivos secundários. Ela pressupõe não só que existam seres “inteligentes” (ou melhor, que tenham capacidade de linguagem simbólica), mas também que tenham tecnologia de transmissão de sinais e queiram dar sinal de sua existência. Não há nenhuma teoria científica que possa nos guiar nesse terreno escorregadio.

Recentemente, os astrônomos encontraram uma pergunta mais produtiva: “Existe vida como a da Terra em outros planetas?” Essa é uma questão que pode

ser testada experimentalmente, encaixando-se assim no paradigma tradicional da ciência. Embora não tenhamos uma teoria geral da vida, sabemos bem como a daqui funciona e como detectar a presença dela em outros planetas.

Por “vida como a da Terra” entenda “micróbios”. Existem muito mais espécies e indivíduos microscópicos do que macroscópicos. Os micróbios causam um impacto muito maior sobre a biosfera do que os seres macroscópicos. Por exemplo, a camada de ozônio (O_3) é formada pela fotossíntese, produzida principalmente por algas marinhas unicelulares. Essa é a assinatura mais robusta de atividade biológica. Micróbios anaeróbicos que se alimentam da matéria orgânica no intestino de animais e da decomposição de restos vegetais produzem uma camada de metano (CH_4) na alta atmosfera. Esses gases podem ser detectados facilmente por um observador fora da Terra, enquanto os seres macroscópicos permanecem literalmente ocultos sob



Lista de exoplanetas mais próximos descobertos até o momento. A grande maioria dos exoplanetas conhecidos são gigantes gasosos, maiores que Júpiter, com órbitas muito próximas da estrela central. Isso não representa necessariamente a regra geral, mas sim uma limitação das técnicas atuais, por serem esses casos mais fáceis de detectar. (Crédito: California Carnegie Planet Search)

a atmosfera, sob a água ou enterrados no solo. A contaminação biológica por micróbios é facilmente detectável. Mais do que isso, essa forma simples de vida infesta nosso planeta há 3,5 bilhões de anos, contra 0,6 bilhão de anos da vida macroscópica. A janela temporal dá uma grande vantagem de detecção aos micróbios. Os ETs atuais são invisíveis e isso os torna mais fáceis de encontrar!

Mas a probabilidade de formação de vida como a da Terra seria alta ou baixa em outros lugares? As células têm alta percentagem de água, indicando a importância do meio líquido para elas. Nesse aspecto, a Terra é um local árido para os padrões cósmicos. A água é uma das substâncias mais comuns e mais antigas do Universo. Ela se formou usando o hidrogênio gerado no Big Bang e o oxigênio expelido na morte da primeira geração de grandes estrelas, há 13,5 bilhões de anos. Os outros átomos biogênicos, nitrogênio e carbono, também foram formados há mais de 12 bilhões de anos e estão

entre os mais abundantes do Universo. Esses quatro elementos químicos, C, H, O e N, formam mais de 99% da matéria viva e são fáceis de encontrar. Para formar as moléculas essenciais da vida, basta adicionar um pouco de energia, que é bem abundante nas zonas de habitabilidade (ou água líquida) em torno de cada uma das 200 bilhões de estrelas da Via Láctea. Os ingredientes essenciais para a vida são muito comuns no Universo, o que indica que ele é biófilo. Mesmo as grandes moléculas da vida, como os aminoácidos, são produzidas por reações químicas abióticas no espaço. Muitos meteoritos que aqui aportaram trouxeram aminoácidos, inclusive de tipos diferentes dos 20 usados pelos seres vivos.

Mais um ponto a favor da ideia de que nosso universo é biófilo: a vida estabeleceu-se praticamente junto com o próprio planeta. Os últimos grandes meteoritos com massa suficiente para produzir choques esterilizantes caíram cerca de 3,9 bilhões de anos atrás e al-

gumas rochas de 3,8 bilhões de anos já apresentam indicadores de processos biológicos. Depois disso, muitos eventos catastróficos castigaram o planeta, como quedas de meteoros, vulcanismo e glaciações, mas a vida nunca foi totalmente interrompida. Pelo contrário, após cada catástrofe ela apresentava uma diversificação maior. Esse cenário mais amplo indica que a vida não é tão frágil quanto muitos pensam. É uma praga agressiva e resistente. O fato de parecer para nós tão complicada não implica que também o seja para a natureza. Provavelmente o fato de ainda não a termos descoberto fora da Terra deve-se ao fato de ainda não termos procurado com os meios adequados.

Onde procurar? O sistema solar é até um pouco irrelevante para a procura da vida. Nele, só nosso planeta está situado na zona de água líquida (em ambiente aberto). Marte congelou há mais de 3,5 bilhões de anos e, no máximo, espera-se encontrar fósseis microscópicos que teriam vivido antes



CoRoT-7b: exoplaneta com massa de apenas cinco vezes a da Terra. A estrela hospedeira é bem parecida com o Sol e o raio da órbita desse planeta é menor que o de Mercúrio, o que indica que ele é um inferno de calor. Não é propício à vida, mas um astro de grande interesse para a planetologia. (Crédito: ESA)

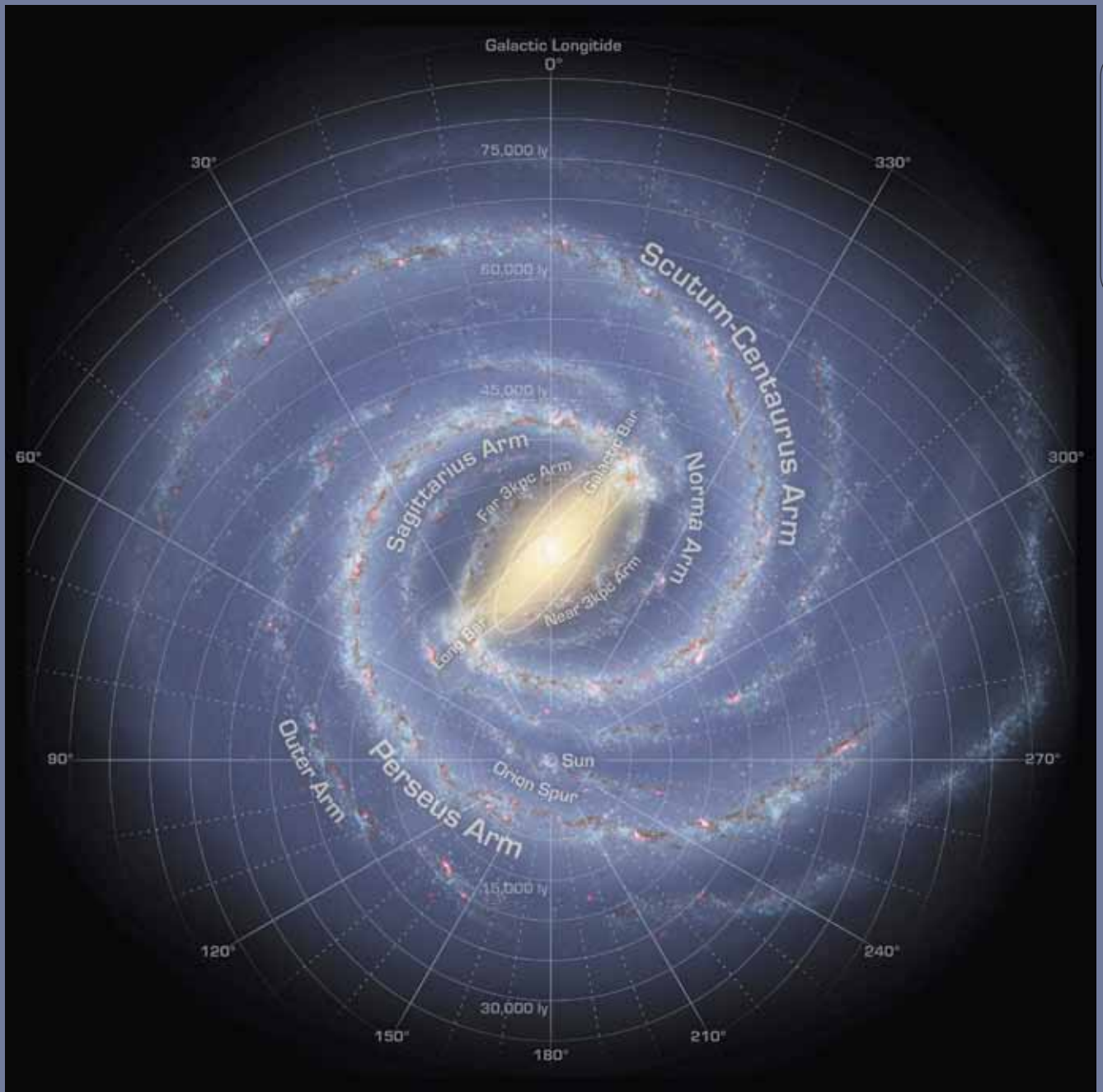
disso. Outros lugares, incluindo a lua de Júpiter Europa, embora não impeditivos para a vida, são muito inóspitos para se investir grande quantidade de recursos humanos e financeiros. A descoberta de mais de 400 planetas em torno de outras estrelas, em poucos anos de pesquisa, indica que, como era esperado teoricamente, cada estrela é circundada por um carrossel de planetas. Mesmo se nos restringirmos aos planetas rochosos, que circulam na zona de água líquida, o número esperado é de bilhões, só na Via Láctea. Tudo o que temos de fazer é construir telescópios com poder de resolução

espacial suficiente para fotografar o planetinha separado da estrela hospedeira. Depois disso, analisamos sua luz através de um espectrógrafo e procuramos as assinaturas de atividade biológica. Em menos de duas décadas isso será factível e centenas de planetas serão descobertos e analisados a cada noite. Pode-se imaginar um catálogo de planetas extrassolares com uma coluna marcando a identificação positiva do ozônio e outra do metano. Se houver muitos com sinais de vida, estará provado que a vida é uma mera oportunidade da química comum. Mas pode até ser que não se

centenas de planetas serão descobertos e analisados a cada noite

encontre nenhum! Qualquer dos dois resultados terá um profundo impacto no pensamento humano, e a grande maioria das pessoas atuais viverão esses momentos excitantes. A essa altura, a instrumentação astronômica será tão sofisticada que os admiráveis telescópios atuais serão quase peças de museu. O possível resultado negativo não será um problema para a ciência, pois ela funciona assim, cria situações críticas para testar suas afirmações. O teste da realidade é seu crivo de veracidade e será a primeira vez que a humanidade poderá discutir essa questão com dados nas mãos.

A procura por exoplanetas rochosos tem avançado rapidamente, a partir do lançamento do satélite CoRoT, do qual o Brasil é sócio, que já fez diversas descobertas importantes. O satélite Kepler também está entrando em operação e a lista de planetas rochosos deve crescer rapidamente nos próximos anos.



Em cima: Via Láctea como seria vista do topo. Nossa galáxia é do tipo espiral. Ela tem uma barra de estrelas velhas no centro (amareladas) e braços com estrelas jovens (azuis) na periferia. Ainda não sabemos se ela tem dois ou quatro braços. (Crédito: NASA/Spitzer)

Em baixo: Via Láctea como a vemos a partir da Terra – de perfil. As manchas nebulosas são estrelas individuais, como Galileu demonstrou através de sua luneta há 400 anos. As manchas escuras são nuvens de poeira que obscurecem as estrelas de fundo. (Crédito: ESO)

Capítulo 4

Estrelas variáveis e o Universo transiente

O centro da Via Láctea – em torno do qual giram cerca de 200 bilhões de estrelas, inclusive o Sol – é um lugar turbulento. Provavelmente porque em seu ponto central reside um buraco negro supermassivo. A massa desse monstro seria equivalente à de quatro milhões de estrelas como o Sol, espremidas no volume de uma única grande estrela. O buraco negro fica bem no centro e está oculto sob massas turbulentas de matéria muito quente e em alta velocidade: perto do astro gigante, sua enorme gravidade pode estar agitando essas massas a uma velocidade de meio milhão de quilômetros por hora. Observações recentes da região onde deve estar o astro negro indicam que ela mede apenas 30 milhões de quilômetros – cinco vezes menor do que a distância do Sol à Terra. Isso é relativamente pouco, e dá uma ideia de como estariam concentradas as quatro milhões de massas solares no centro galáctico.

O estudo das estrelas gigantes é um dos grandes desafios da astronomia atual. São muito luminosas e raras, e, por

isso, são um campo ainda pouco explorado pela astronomia. Para se ter uma amostra razoável de estrelas gigantes, é necessário procurá-las em outras galáxias, além da nossa. Além disso, justamente por serem muito grandes, elas são instáveis, ou oscilantes: passam por fortes mudanças de brilho em períodos curtos. Curto, nesse caso, significa alguns anos. De um século para outro, elas podem sofrer mudanças ainda mais drásticas, que são, geralmente, fantásticas erupções de energia. A energia escapa tanto na forma de luz quanto de matéria, que a estrela ejeta para o espaço à sua volta. Em vista dessas dificuldades, representa muito para o Brasil poder utilizar um telescópio como o Grande Telescópio Sinóptico de Estudos, LSST na sigla em inglês. O LSST promete ser, num futuro próximo, o instrumento mais abrangente e o mais rápido na nova era digital da astronomia.

Um dos mistérios que o LSST vai ajudar a desvendar é a perda de massa pelas estrelas gigantes. Observa-se que há uma ligação entre as rápidas varia-

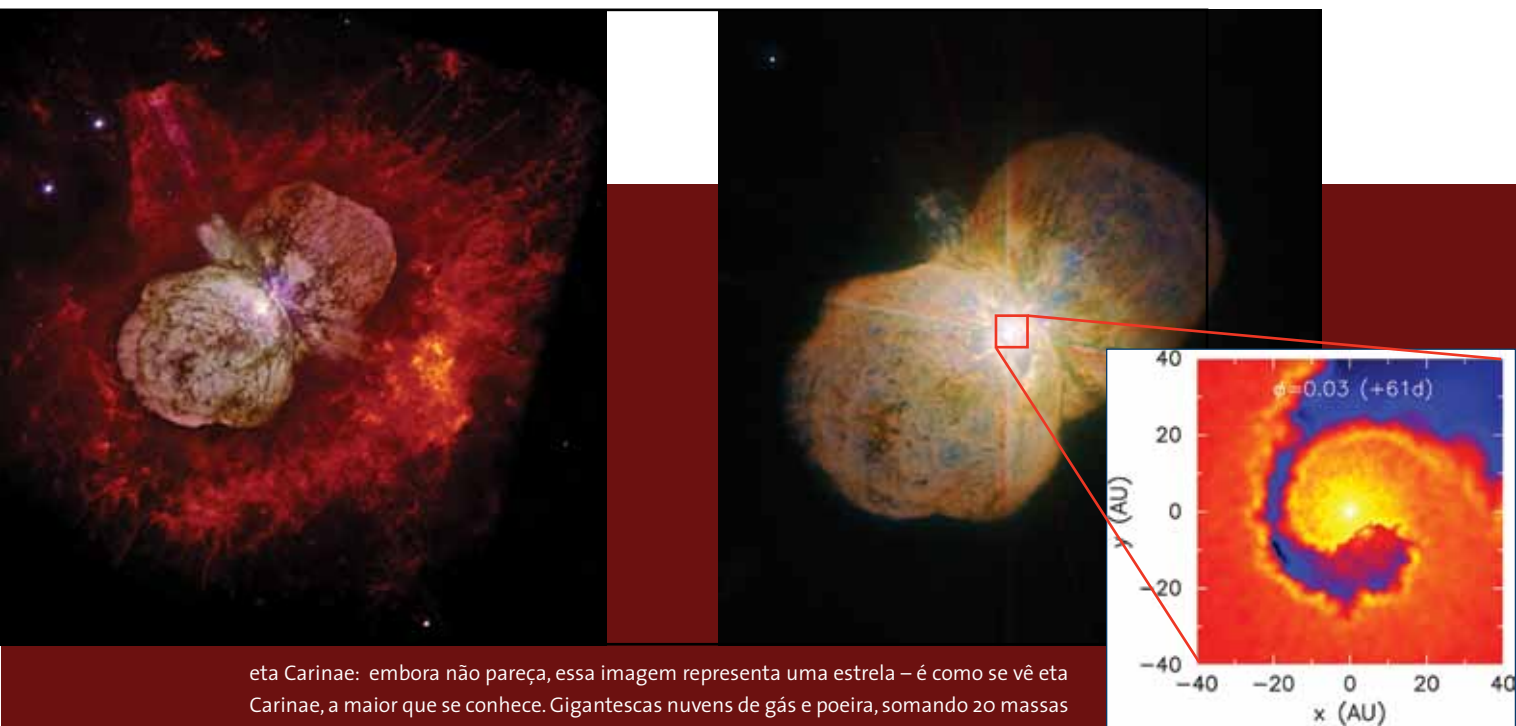
ções de brilho e a perda de massa, mas não se sabe como isso acontece. Existem casos em que a perda de massa acontece em erupções gigantes, nas quais a estrela oscilante chega a perder matéria na proporção de dez massas solares – ou seja, a estrela perde matéria equivalente à de dez estrelas como o Sol.

Isso aconteceu há dois séculos com a estrela Eta Carinae, situada na Via Láctea. Esse tipo de turbulência cósmica recebe o nome de “supernova impostora”, porque imita a explosão derradeira na vida das estrelas muito grandes, chamada de supernova. Eta Carinae, porém, não estava nos estertores finais quando estremeceu há dois séculos. Continuou existindo. Daí o interesse de suas crises para o estudo das grandes estrelas – inclusive porque se registram explosões ainda maiores, conhecidas hoje como surtos de raios gama.

Alguns surtos são relacionados com a acreção, ou seja, a absorção de matéria pelos buracos negros nos centros das galáxias ativas. Buracos negros são

as estrelas mais densas que existem e devoram estrelas inteiras com sua gravidade descomunal. Um evento desse tipo foi descoberto pelo Telescópio Auger, um grande detector internacional de raios cósmicos localizado na Argentina e coordenado por brasileiros.

Além das estrelas comuns, grandes ou pequenas, os astrônomos brasileiros também estudam estrelas mais complicadas, que eles chamam de objetos compactos. Existem vários tipos de objetos compactos, como os buracos negros, que podem ter, mais ou menos, a escala de massa de uma estrela comum ou formar o núcleo de uma galáxia inteira. Neste caso, podem ter massa maior que milhões de sóis. Existem ainda discos de matéria em torno de estrelas ou de galáxias, assim como estrelas chamadas anãs brancas. Elas são o que sobra das estrelas, ao terminar seu combustível nuclear. Elas explodem e deixam de resíduo um “caroço” duro, pequeno e pouco luminoso. Acabam assim cerca de 98% dos astros.



eta Carinae: embora não pareça, essa imagem representa uma estrela – é como se vê eta Carinae, a maior que se conhece. Gigantescas nuvens de gás e poeira, somando 20 massas solares ejetadas pela estrela no ano de 1843, não permitem que ela seja vista diretamente. Ela continua perdendo massa ao ritmo de uma Terra por dia. (Crédito: Nathan Smith e NASA/HST). Técnicas especiais permitiram revelar a existência de um par de estrelas (invisíveis ao telescópio) e representadas pela simulação computacional de Atsuo Okasaki (à direita). Note a tremenda colisão entre os ventos ejetados pelas estrelas companheiras, que espiralam à medida que elas seguem suas órbitas. (Crédito: ESO e A. Okazaki)

Eta Carinae é uma estrela do tipo variável: muda de brilho constantemente. Nesse caso, as variações seriam acompanhadas por grandes jorros de matéria. Existem sinais fortes – obtidos em grande parte pela astronomia brasileira – de que a nuvem oculta duas estrelas, girando uma em torno da outra. Ambas seriam enormes, já que, juntas, emitem uma energia equivalente a cinco milhões de estrelas como o Sol.

Em todos esses casos, é útil observar a variação do brilho dos objetos estudados. Isso indiretamente fornece informação sobre as camadas internas das estrelas: como a matéria está em-

pilhada lá dentro? Certas anãs brancas, por exemplo, têm pulsações de luz, variações regulares na luminosidade. Depois de mapeadas durante algum tempo, as pulsações dão muitas indicações importantes: pode-se estimar a gravidade e a temperatura na superfície desse objeto, ou de que maneira a estrela está se transformando. É possível até imaginar como era a estrela que criou o objeto compacto. As pulsações são o único meio de estudar as estrelas “por dentro”. É o mesmo tipo de estudo do interior da Terra pelas oscilações produzidas por terremotos, chamado de sismologia.

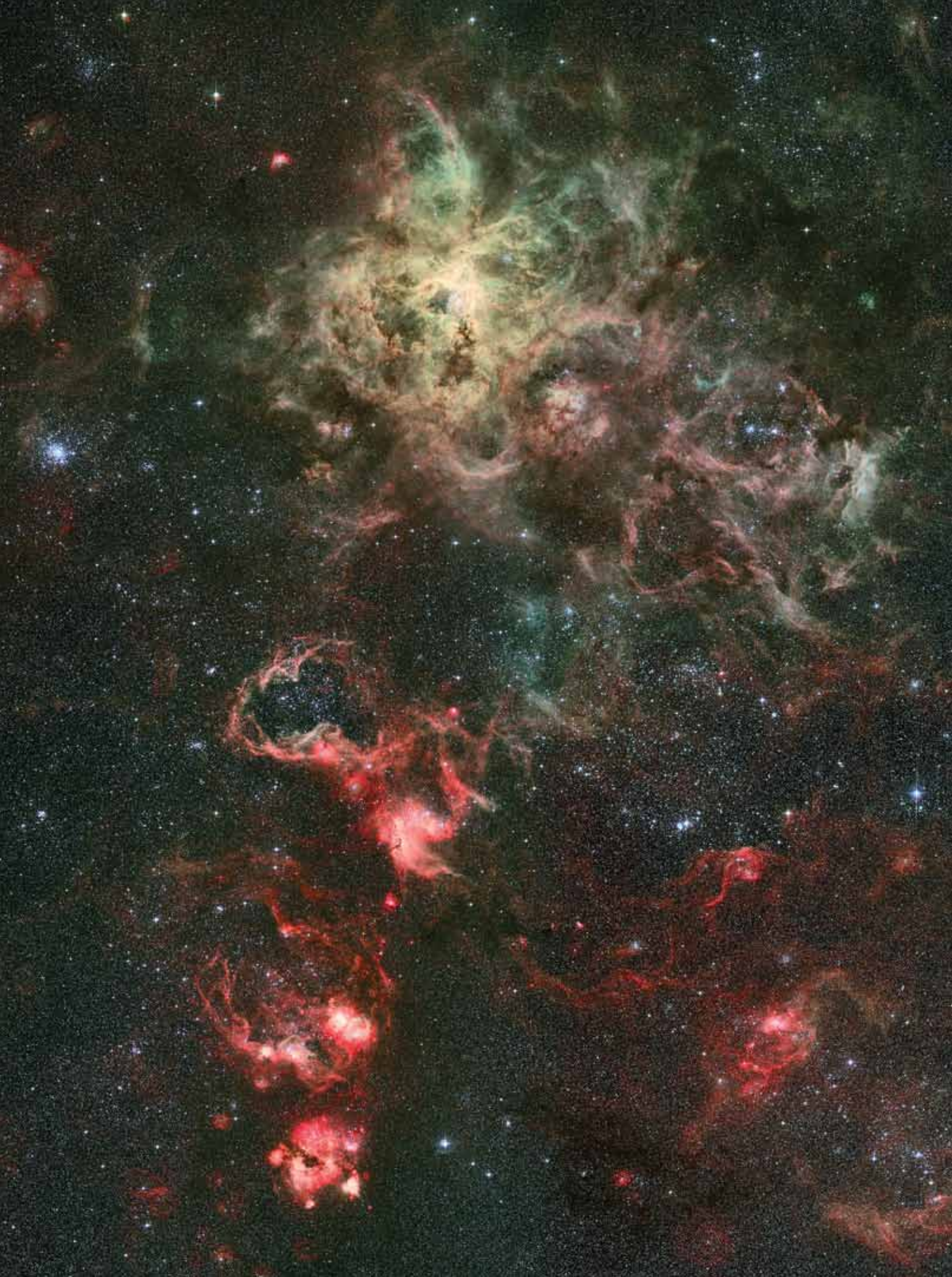
Ao lado, a nebulosa da Tarântula (na parte superior) é uma das regiões mais estudadas com o objetivo de entender a formação das estrelas de grande massa. Mede cerca de mil anos-luz, ou dez mil trilhões de quilômetros, e contém grandes nuvens de matéria energizadas pela radiação de estrelas gigantes recém-nascidas. Está a 170 mil anos-luz da Terra, o que é bem perto em termos astronômicos, e fica numa galáxia satélite da Via Láctea, a Grande Nuvem de Magalhães, que pode ser vista a olho nu. (Crédito: ESO)

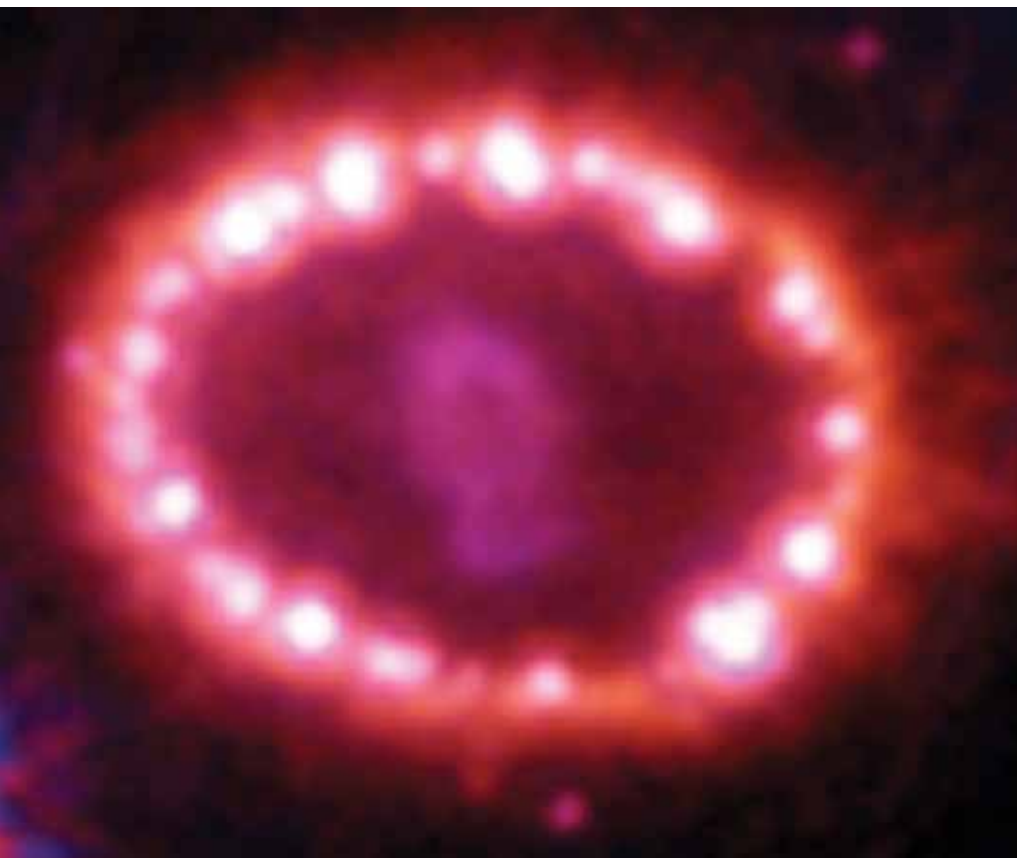
Mas, além disso, medindo a idade das anãs brancas mais antigas de uma galáxia, chega-se a uma estimativa da idade da própria galáxia. Mas, por serem pouco luminosas, só enxergamos as anãs brancas da nossa própria galáxia. Outra possibilidade interessante é verificar se a anã branca está acompanhada de outra estrela ou de um planeta. Esse tipo de estudo foi feito por brasileiros e seus colaboradores estrangeiros para algumas estrelas. Em duas delas, por exemplo, chamadas G117-B15A e R548, a indicação é de que estão sozinhas – se houver um objeto girando em torno delas, deve ser bem pequeno, mais de dez vezes menor que Júpiter. Noutra investigação, nos Estados Unidos, com a colaboração de brasileiros, descobriu-se o primeiro candidato a planeta girando em torno de uma anã branca, a GD 66.

Também foi possível triplicar o número de anãs brancas pulsantes conhecidas. Nos próximos anos, a meta é estudar vários outros astros desse tipo,

inclusive usando telescópios como o de 1,6 metro de diâmetro do Laboratório Nacional de Astrofísica, o SOAR e o Gemini Sul, ambos situados no Chile. Um dos desafios interessantes dessa pesquisa são dois fenômenos previstos há 40 anos e nunca antes verificados: a cristalização e a liberação de calor latente, como quando a água congela. O estudo recente de anãs brancas no aglomerado globular NGC 6397 por brasileiros e seus colaboradores estrangeiros comprovou esses dois fenômenos.

Surtos de raios gama são os eventos de maior energia observados no Universo, e quase nada se sabe de conclusivo sobre eles. Em milésimos de segundo, às vezes, os surtos de raios gama liberam mais de 10⁴⁴ Joules – ou seja, cem milhões de vezes mais do que o Sol produz em um século. Esse incrível farol cósmico não é de luz visível, como acontece com o Sol, mas de raios gama, que são um tipo de radiação eletromagnética, como a luz comum, só que sua energia é muitíssimo mais alta.



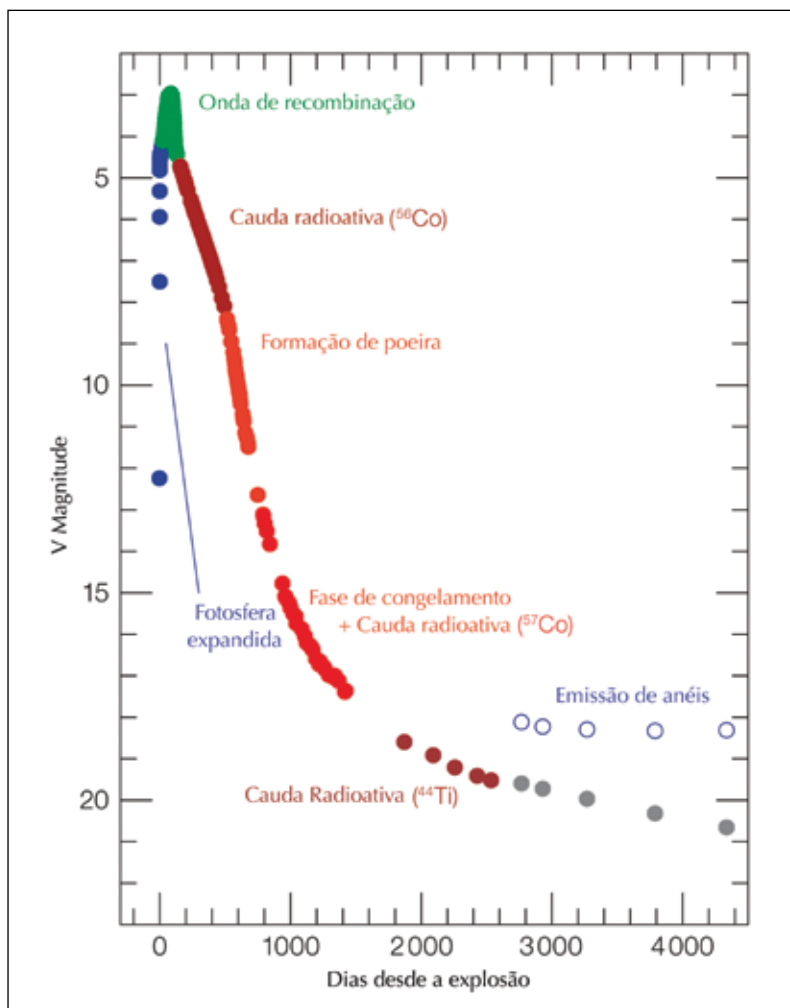


SN1987A

Em 1987 viu-se pela primeira vez ao telescópio, a uma distância relativamente pequena, uma grande explosão estelar: uma supernova, que por alguns dias brilhou mais que a galáxia inteira. Chamada de SN1987A, ela ocorreu há 170 mil anos. Esta imagem mostra a colisão da onda de choque da explosão (como um colar de pérolas), que dez anos após a explosão atingiu o material anteriormente ejeta-

do pelos ventos da estrela.

(Crédito: NASA/HST)



O gráfico mostra o aumento do brilho da SN1987A e depois o declínio, à medida que os restos da estrela se espalhavam e seu caroço central se reduzia a um corpo denso mas apagado. (Crédito: ESO)

Mas os instrumentos disponíveis são ineficientes para essa tarefa

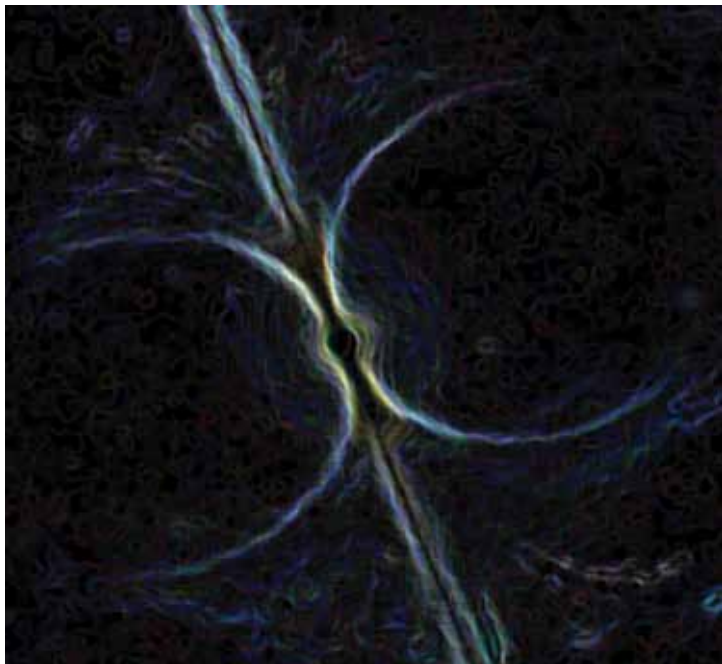
Além do surto principal, essas detonações deixam uma “claridade” um pouco menos energética, composta de raios X, luz ultravioleta, luz visível, ondas de rádio, luz infravermelha e outras radiações. É o chamado *afterglow* (ou pós-brilho) da explosão. Seja qual for a fonte desses flashes, eles acontecem a bilhões de anos-luz da Terra (um ano-luz equivale a aproximadamente dez trilhões de quilômetros).

Como são um clarão intenso, e visto dessa distância, pode-se imaginar o problema: no princípio nem era possível saber direito de que ponto do espaço aquilo vinha. Os primeiros surtos foram registrados no final dos anos 1990, e são vistos duas ou três vezes por semana, detectados por telescópios em órbita da Terra. Mas os instrumentos disponíveis são ineficientes para essa tarefa. Acreditava-se que se poderiam ver mais surtos se existissem mais telescópios.

Os cientistas estão trabalhando duro para explicar esses fenômenos. Numa descoberta importante, foi pos-

sível associar o *afterglow* de surtos mais demorados (mais de dois segundos de duração) a uma supernova: a explosão de uma estrela gigante. Essa descoberta foi feita analisando os raios X e a luz visível de vários surtos longos. Com isso foi possível, pela primeira vez, localizar as explosões de maneira razoavelmente precisa – chegou-se a supernovas no mesmo local, indicando que o clarão vinha delas. Mais recentemente foi possível analisar o *afterglow* de surtos mais rápidos, com menos de dois segundos de duração.

O primeiro clarão desse tipo foi localizado na borda de uma galáxia anã. No entanto, esse surto não veio de uma supernova, de acordo com cálculos que vêm sendo feitos. Mesmo os surtos demorados não parecem estar associados apenas a uma supernova simples, isto é, à explosão de uma única estrela ao desmoronar. A ideia atual é que eles acontecem quando uma grande estrela forma uma dupla com um buraco negro, girando velozmente um em volta do outro.



Magnetosfera de um pulsar. Os pulsares são estrelas de nêutrons com campos magnéticos fortíssimos, da ordem de trilhões de Gauss. Esses “cadáveres de estrelas” giram muitas vezes por segundo e seus polos magnéticos são inclinados em relação ao eixo de rotação, como no caso da Terra. Como eles emitem luz só num feixe estreito ao longo do polo, o feixe varre o espaço como um farol marítimo. Um observador distante vê uma sequência de pulsos luminosos - daí o nome pulsar. (Crédito: NASA/Chandra)

Se houver uma trombada entre os dois astros, por algum motivo, a colisão poderia gerar um surto de longa duração. No caso dos surtos rápidos, imagina-se que eles venham de um rearranjo interno de um resto de supernova – o caroço que sobra da morte de uma estrela gigante. Acontece que esse tipo de objeto contém apenas partículas atômicas, como se ele fosse um núcleo atômico gigante, feito de nêutrons (o nêutron é um dos três componentes dos átomos, ao lado dos elétrons e dos prótons).

Por isso, alguns astros gerados pelas supernovas são chamados de estrelas de nêutrons. Mas os nêutrons (assim como os prótons) são feitos de partículas ainda menores, que são os quarks. Significa que, se os nêutrons se desintegram, liberam os quarks de que são feitos e, junto com eles, uma imensa

quantidade de energia. Essa energia é comparável à que se observa nos surtos de raios gama, indicando que o que sobra do astro extinto pode ser um novo tipo de astro: uma estrela de quarks.

Todos os surtos de raios gama observados estão fora da Via Láctea, mas existe um fenômeno parecido, que se origina dentro da nossa galáxia. São os “repetidores de raios gama macios”, que emitem principalmente raios X, mas vez por outra liberam surtos moderados de raios gama (um bilhão de vezes mais fracos que seus parentes distantes), com duração de um décimo de segundo. Apenas quatro surtos desse tipo foram vistos até agora, três deles na Via Láctea e outro na Grande Nuvem de Magalhães, uma galáxia satélite da nossa. Um deles, o SGR 1806-20, na constelação do Sagitário, brilhou centenas de vezes

mais que os outros. A origem desses surtos próximos pode ser uma estrela de nêutrons com um campo magnético muito forte à sua volta.

Em algumas circunstâncias, esse ímã poderoso pode provocar rachaduras no corpo do astro, que tende a “preencher” os buracos de forma violenta. Quanto maior a deformação, maior é o surto energético produzido. Outra explicação plausível é que a estrela de nêutrons pode ter um disco de matéria à sua volta, provavelmente feito da matéria da própria estrela que gerou a estrela de nêutrons. Se partes do disco caírem sobre a estrela de nêutrons, pode haver surtos de raios gama. O uso de grandes telescópios, como os de dezenas de metros que estão sendo planejados agora, certamente poderá ajudar a definir melhor o que acontece quando os astros criam essas imensas explosões luminosas no céu.

A grande maioria das estrelas não é solitária, como o Sol. Elas existem principalmente em duplas (mas também em trios ou em arranjos maiores, reunindo

várias estrelas, todas girando em torno de um centro comum). Quase 60% das estrelas próximas do Sol são duplas, ou binárias, o que torna muito importante o estudo dessas combinações. Mas por que as estrelas duplas são tão comuns? A resposta pode ser uma espécie de equilíbrio “natural”: veja o caso do sistema solar, formado pelo Sol e pelos planetas que giram à sua volta. Quase toda a massa do sistema encontra-se no Sol, que é, sozinho, mil vezes mais pesado que o conjunto dos planetas. Em compensação, os planetas respondem por quase toda a rotação do sistema (que é medida por um número chamado momento angular). Essa divisão vem de quando o sistema solar se formou, a partir de uma nuvem de matéria em rotação, que aos poucos foi se contraindo por efeito da força gravitacional. No final, houve uma divisão: a maior parte da massa da nuvem inicial acumulou-se no centro e deu origem ao Sol; em compensação, a maior parte da rotação da nuvem foi repassada para os planetas.

Note que o momento angular depende do raio de rotação e da velocidade de rotação: antes da nuvem encolher, o raio era grande e a velocidade pequena, mas o raio foi diminuindo enquanto a nuvem se contraía e a velocidade aumentava. Mas partes da matéria da nuvem condensaram-se longe da estrela. No fim das contas, o sistema conservou todo o momento angular da nuvem. Nada se perdeu.

É previsível, portanto, que esse mesmo mecanismo leve à formação de estrelas duplas, em decorrência da necessidade de conservar os momentos angulares das nuvens que as criaram.

Pelo mesmo raciocínio pode-se especular que boa parte das estrelas não binárias deve ter planetas à sua volta, isto é, que a existência de planetas seja mais uma regra do que uma exceção no Universo, ou pelo menos nas galáxias com rotação, espirais como a nossa.

O nascimento das estrelas é um dos aspectos mais desafiadores da ciência do Universo, e o estudo dos sistemas binários é uma chave para entender esse

processo. É nos sistemas binários que se chega com mais precisão e confiança a alguns dos números básicos das estrelas, como a massa, o raio e a temperatura. Os astrônomos construíram modelos matemáticos que descrevem bem a estrutura interna e a evolução das estrelas situadas dentro de certos limites: as que têm massa igual ou maior que a do Sol, até o limite de 20 vezes a massa do Sol ($M_{\odot}$). Para estrelas menores ou maiores que esses limites, ainda aparecem discrepâncias importantes entre os modelos e as observações.

Tentar cobrir essa lacuna, portanto, parece ser um dos focos da pesquisa nesse campo, atualmente, e o estudo das estrelas duplas pode trazer algumas respostas para lacunas existentes na dinâmica e estrutura estelar. A ideia é localizar e investigar sistemas adequados para se medir com precisão as massas, os raios e as temperaturas estelares. Parece promissor estudar duplas de estrelas jovens nos estágios iniciais da evolução estelar.

Uma descoberta excitante, feita recentemente, envolve sistemas binários de estrelas bem pequenas (chamadas anãs marrons) que também são eclipsantes, o que quer dizer que, ao girar, uma das estrelas passa periodicamente à frente da outra, quando se olha do ponto de vista da Terra. Esse fato ajuda muito a analisar os astros que compõem uma dupla, especialmente para calcular seus raios e temperaturas.

As estrelas atualmente se formam em “berçários”, que são regiões de grande concentração de poeira e gás, ou seja, nuvens de matéria no espaço. Em alguns pontos da nuvem, a matéria dá início à formação estelar porque entra em processo de contração pela atração gravitacional entre as partículas de poeira e as moléculas de gás. Como acontece em geral, as estrelas duplas são comuns nesses agrupamentos e alvos privilegiados para se observar a evolução estelar nos estágios iniciais. Não é simples como parece, porque é preciso combinar um grande número de dados distintos. As

curvas de luz, por exemplo, indicam como o brilho de uma estrela varia com o tempo, e, entre outras coisas, pode revelar a massa da estrela.

Também é preciso determinar corretamente a cor da estrela, que está associada à temperatura nas camadas externas da estrela: as vermelhas são mais frias que as azuis, por exemplo. Outro dado crucial são as mudanças nas estrelas por causa do movimento delas: se uma estrela se aproxima de um observador, sua cor – não importa qual seja – fica um pouco mais azulada. Quando a estrela se afasta, a cor fica mais avermelhada, pois o movimento em nossa direção diminui o comprimento de onda da luz emitida e, quanto menor o comprimento de onda, mais azul parece. Esse trabalho fica mais fácil, porém, quando se tem à disposição instrumentos de primeira linha, como o SOAR e o Gemini. Eles têm dado um impulso firme aos estudos dos brasileiros sobre nascimento, vida e morte das estrelas.

Outro campo de estudo é o cálculo da idade do universo a partir do



Buraco negro binário em 3C75. No centro das grandes galáxias sempre se encontram buracos negros gigantes. Esta tem dois. A massa do conteúdo estelar do bojo dessas galáxias é proporcional à massa do buraco negro central, indicando que ele está intimamente ligado a toda a galáxia. É possível que os buracos negros gigantes sejam as sementes das galáxias. (Crédito: NASA/Chandra).

estudo de suas estrelas mais velhas, como as anãs brancas frias. Essa pesquisa é feita desde 1987 por um grupo que reúne cientistas brasileiros e americanos. Naquela época, esse grupo era o único que sugeria uma idade inferior a 15 bilhões de anos para o universo, e estava no rumo certo: a estimativa atual, bastante precisa, é de que o cosmo tenha 13,7 bilhões de anos. Além disso, esse mesmo grupo de pesquisadores foi o primeiro, em 1992, a localizar um “diamante no céu” – uma estrela de carbono cristalizado da mesma forma que um diamante, batizada com a sigla BPM 37093, pois é a estrela número 37.093 do catálogo chamado Bruce Proper Motion.

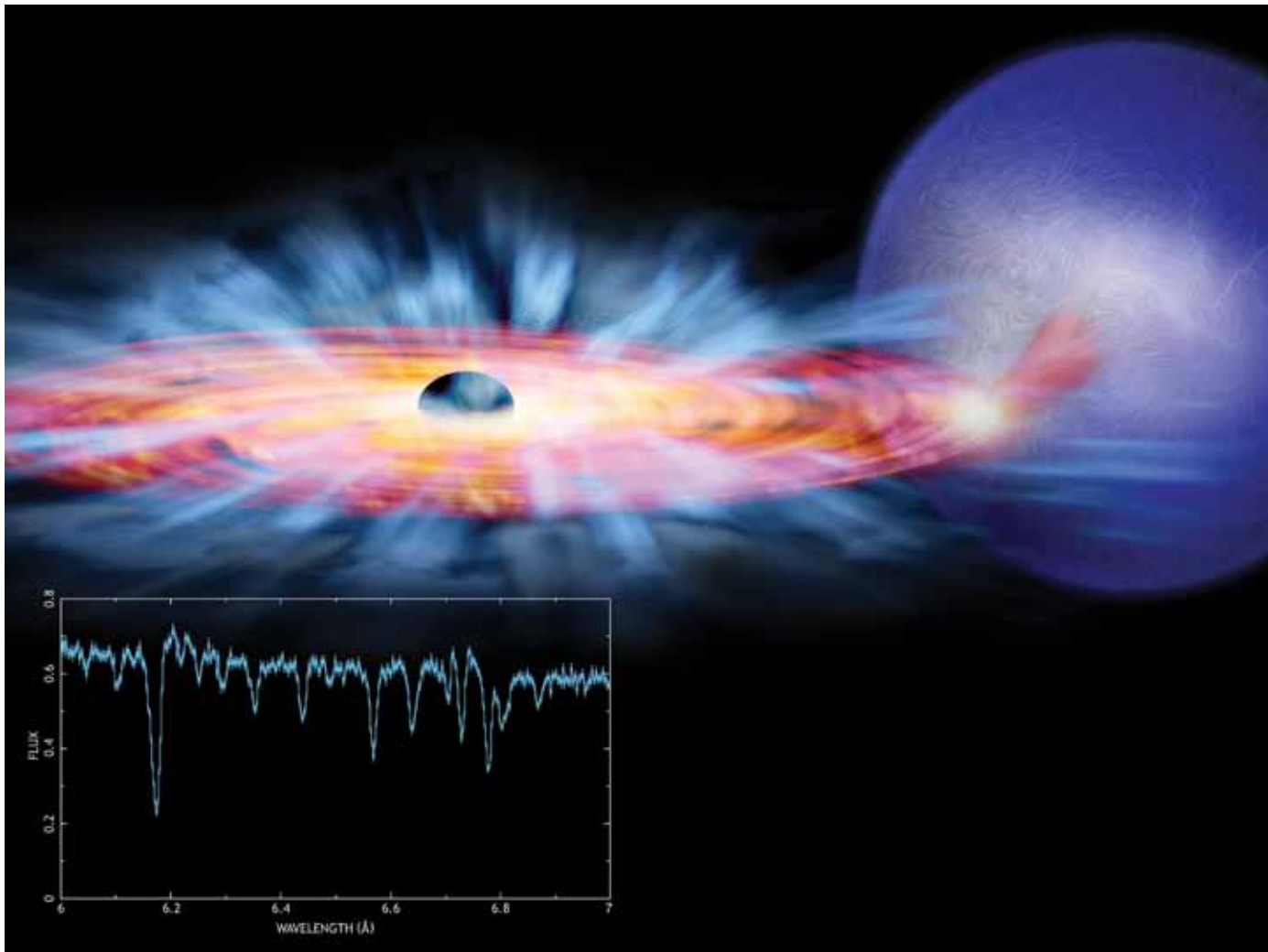
Depois disso, o grupo descobriu várias outras estrelas cristalizadas, utilizando, para isso, dados do Telescópio Espacial Hubble. Fez progresso também ao localizar anãs brancas massivas que podem estar prestes a gerar uma supernova, se receberem massa de outra estrela em um sistema binário interagente. Os telescópios usados para

estudar as estrelas massivas foram do Sloan Digital Sky Survey e os Gemini. Supernovas são grandes explosões terminais das estrelas, e, nesse caso, as possíveis supernovas são de um tipo particular, chamado Ia: acontece quando uma anã branca mais pesada tem uma companheira que se expande e joga pedaços dela na anã branca, seguindo a atração gravitacional.

A matéria da companheira cai na anã branca, que não suporta o peso extra e explode. As supernovas Ia são muito importantes porque, no caso delas, é possível saber qual foi a quantidade de luz gerada pela explosão. Com isso, pode-se deduzir a que distância ela ocorreu: se estiver longe, menos luz chega à Terra, e a explosão vai parecer mais fraca. Se ela parecer muito brilhante, é porque está mais perto. Essa peculiaridade tornou as supernovas Ia instrumentos poderosos para estudar a expansão do universo, por exemplo, e elas foram as primeiras a indicar a existência da energia escura, de repulsão.

Na década de 1970 ficou demonstrado que é muito comum no universo uma estrela transferir matéria para outra, em certos sistemas binários, que reúnem não apenas estrelas tradicionais, mas também anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros. Essa transferência ocorre porque, na evolução de todas as estrelas, quando acaba o combustível nuclear no núcleo, elas se expandem, tornando-se gigantes e supergigantes e a distância entre as estrelas pode tornar-se similar ao raio delas. Existe um zoológico nesse mundo: binárias de raios X de alta e baixa massa, variáveis cataclísmicas, sistemas simbióticos etc.

Cada um desses nomes designa alguma característica dos sistemas, mas existe um traço comum à maioria deles: é que a energia do conjunto é dominada não pelo brilho de cada estrela em particular, mas pela transferência de massa de um para outro. Esse processo leva à formação de anéis de poeira e gás semelhantes aos anéis de Saturno, mas apenas na aparência.



O sistema binário GRO 1655-40 é composto de uma estrela normal de duas massas solares ligada gravitacionalmente a um buraco negro de sete massas solares. A ilustração mostra matéria sugada da companheira normal para o disco de acreção em torno do buraco negro. O disco de acreção é tão quente que emite raios X e expele ventos a altas velocidades. (Crédito: M. Weiss NASA/Chandra)



Chamados de disco de acreção, os anéis em duplas de estrelas envolvem a perda de massa de um dos astros e a queda acelerada dessa massa em direção ao outro componente da dupla.

Por conservação de momento angular, a massa cadente entra em órbita ao redor da estrela que a atraiu, adquirindo velocidades muito altas que aquecem a massa circulante. Com isso, ela passa a emitir grande quantidade de luz. Ocorrem, ao todo, quatro transformações: quando está prestes a cair, a matéria da estrela que perde massa tem energia potencial porque está sendo atraída pela gravidade da outra estrela; depois ganha velocidade de queda e de rotação, que é energia cinética; nesse ponto, os choques entre as partículas criam calor, ou energia térmica; enfim, os átomos e moléculas da massa vibram por causa do calor e emitem luz, que é energia radiativa.

Ainda na década de 1970 descobriu-se que também acontecem grandes transferências de matéria no núcleo das galáxias, numa escala muito maior

do que nos sistemas estelares simples. Nesse caso, o objeto que captura massa é um buraco negro gigante, que geralmente tem massa um milhão de vezes maior que a do Sol, podendo chegar a um bilhão de vezes. Buracos negros são os corpos mais densos que existem no universo, já que suas massas enormes estão concentradas em volumes minúsculos, em comparação com as estrelas. Assim como as anãs brancas e as estrelas de nêutrons, eles também são corpos colapsados, isto é, resultam da morte de estrelas normais. Existe uma ordem de grandeza: as anãs são restos de estrelas menores, como o Sol, e as estrelas de nêutrons e os buracos negros resultam da explosão de estrelas grandes.

Além disso, pode haver uma espécie de “promoção”, nessa hierarquia – se uma anã branca receber massa de uma companheira binária, por exemplo, ela pode explodir e transformar-se numa estrela de nêutrons, mais densa e mais compacta. Da mesma forma, se uma estrela de nêutrons receber massa de seu

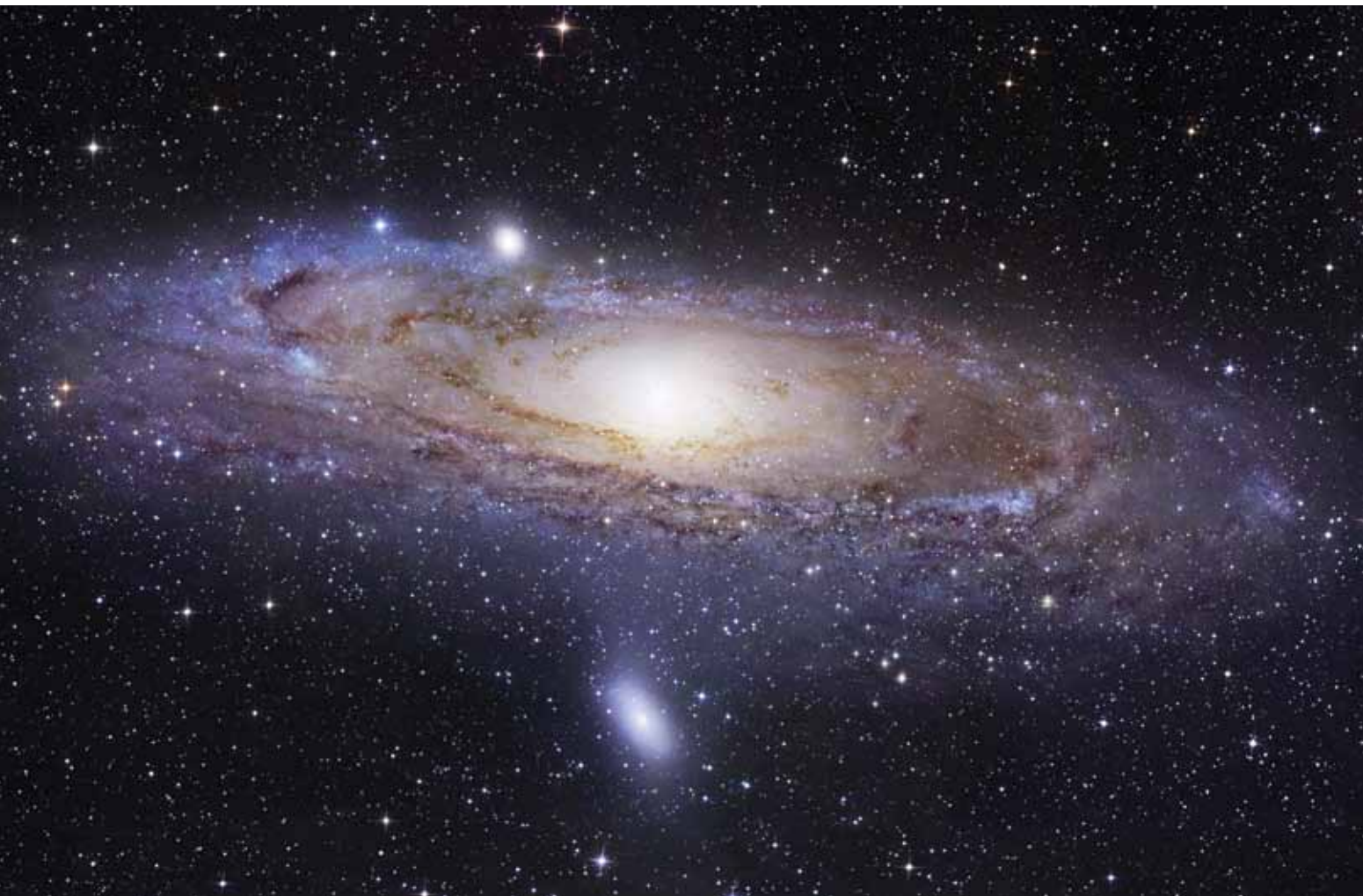
par, pode virar um buraco negro. É por meio dessa acumulação progressiva de massa, aparentemente, que surgem os buracos negros gigantes nos centros das galáxias, ou pela colisão de buracos negros menores, que perdem energia rotacional, isto é, momento angular, pela emissão de ondas gravitacionais. Os núcleos das galáxias são onde as estrelas estão mais concentradas – ou seja, existe muita matéria para alimentar o crescimento dos buracos negros. Então surgem imensos discos de acreção, cujo brilho pode superar, em alguns casos em mil vezes, o de todo o resto da galáxia.

De forma geral, o brilho dos discos de acreção depende da quantidade de massa que cai e entra em rotação ao redor do objeto central. Como essa quantidade varia com o tempo, a luminosidade acompanha essa oscilação. Outra característica marcante é que esse brilho contém muita luz ultravioleta, e mesmo raios X, comparado com o das estrelas comuns. Então, juntando as oscilações de brilho com dados sobre a cor, pode-se

distinguir um disco de acreção de uma estrela comum. Mas essa simplificação, apesar de útil, pode ser enganosa, porque existe uma variedade enorme de sistemas galácticos superbrilhantes.

E esse é um dos desafios que encontraram o SDSS (Sloan Digital Sky Survey) e esperam a nova geração de telescópios gigantes para coletar dados, fazer um vasto recenseamento no universo e classificar toda a fauna cósmica. Depois, é preciso estudar todos os inúmeros tipos de núcleos galácticos para tentar descobrir como eles evoluem, se existem regiões cósmicas mais ou menos povoadas, quais são os tipos mais comuns e assim por diante. O mesmo vale para os discos menores, formados por objetos estelares, em vez de núcleos galácticos. Com os telescópios gigantes da próxima geração, eles podem ser observados em outras galáxias, além da Via Láctea.

No final do século XVIII, o filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) sugeriu que inúmeras “manchinhas” vistas no céu eram, de fato, gigantescas



A observação da galáxia de Andrômeda e a medida de sua distância (2,2 milhões de anos-luz) nos permitiu descobrir que a Via Láctea também forma uma galáxia espiral, uma ilha de 200 bilhões de estrelas. A parte central amarelada é composta por estrelas pequenas e velhas e os braços espirais por estrelas jovens com massas muito superiores à do Sol. Ambas as galáxias são circundadas por halos esféricos muito velhos, formados por aglomerados globulares de estrelas, do tipo de Omega Centauri. (Crédito: Robert Gendler)

A maioria das estrelas da Via Láctea nascem em grandes aglomerados de estrelas que aos poucos se dispersam pelo espaço. São os chamados aglomerados abertos, como NGC3603 (20 mil anos-luz de nós), que são observados enquanto ainda jovens (um milhão de anos). A luz desses aglomerados é dominada por estrelas azuis, de massa muito maior que a do Sol, que com seus ventos poderosos empurram para longe a nuvem que as formou. (Crédito: NASA/HST)

coleções de estrelas, ou “universos-ilhas”, como ele as chamou. Só pareciam pequenas porque estavam longe demais. Hoje sabe-se que algumas daquelas minúsculas manchas (ou *nebulae*, em latim) contêm mais de cem bilhões de estrelas, e são chamadas de galáxias.

A palavra ilha não é mais usada, embora fosse bastante apropriada em vista da enorme distância que separa as estrelas de uma galáxia das estrelas de outra galáxia. O Sol, por exemplo, é uma das centenas de bilhões de estrelas de uma galáxia, a Via Láctea, e as estrelas mais próximas do Sol estão a menos de cem trilhões de quilômetros – ou dez anos-luz, pois cada ano-luz, a distância que a luz percorre em um ano, vale cerca de dez trilhões de quilômetros. Isso é muito pouco comparado à distância da galáxia mais próxima, que está situada a dois milhões de anos-luz, ou 20 milhões de trilhões de quilômetros.

Sabemos relativamente pouco sobre a estrutura interna da nossa própria

galáxia. Isso deve-se em parte porque, como estamos dentro dela, não podemos vê-la por inteiro. A parte que conhecemos melhor são as regiões mais próximas – as que estão do mesmo lado que o Sol em relação ao centro da Via Láctea. O Sol está a cerca de 25 mil anos-luz do centro da Via Láctea, que se encontra na direção da constelação do Sagitário. Essas regiões foram mapeadas ao longo de muitas décadas, mas a outra metade permanece oculta atrás das massas de gás e poeira espalhadas entre as estrelas.

Embora rarefeitas individualmente, essas massas de poeira e gás aos poucos absorvem quase toda a luz que vem do lado de lá da galáxia. Com isso, os telescópios ópticos não recebem informação suficiente para determinar a forma exata do lado oculto da Via Láctea. Isso vale especialmente para os braços espirais, que são uma das principais estruturas das galáxias. Mas como as ondas eletromagnéticas em rádio têm comprimentos de onda muito maior do que os grãos de poeira, elas não são tão



absorvidas por essas massas, e são extremamente úteis nesses estudos.

A compressão do gás pela rotação dos braços espirais das galáxias é um dos principais mecanismos desencadeadores da formação de estrelas nas galáxias, e coloca uma série de perguntas intrigantes. Como eles são criados? Quanto tempo duram? Eles giram junto com as estrelas ou têm velocidade própria, atropelando as estrelas, às vezes, ou sendo atropelado por elas? O que os faz girar, em primeiro lugar? Com os dados disponíveis atualmente, alguns dos braços são efêmeros e outros são estáveis e, portanto, de longa duração.

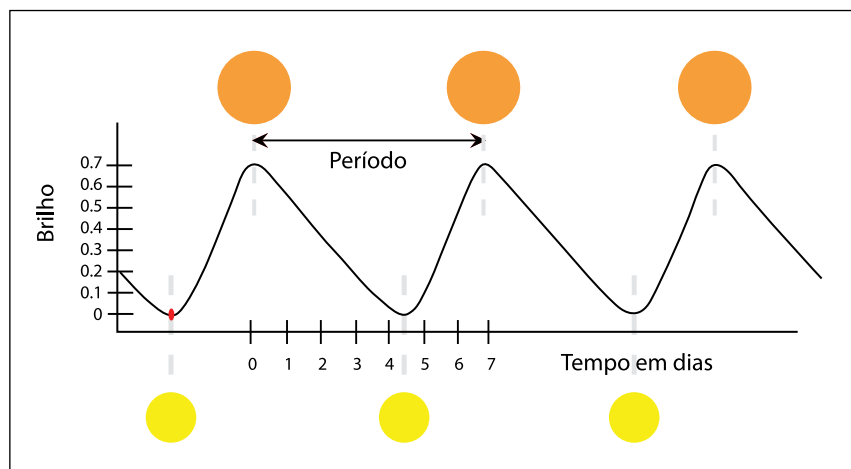
Essa diversidade, naturalmente, está associada à própria origem das galáxias, no princípio do universo. Nessa linha de pensamento, uma hipótese sobre a origem dos braços é que as galáxias perturbam umas às outras: a gravidade de uma galáxia, ao passar perto de uma segunda, pode perturbar o conjunto de gás e estrelas e reorganizá-la na forma de braços espirais. Mesmo

depois da passagem da outra galáxia, ela tende a perpetuar a nova forma espiralada, sugerindo que os braços são estáveis. Mas, para testar essa ideia, é fundamental obter a maior quantidade possível de informação. Caso contrário os modelos teóricos tendem a fornecer respostas inconclusivas.

Atualmente existem meios de contornar o obstáculo das massas de poeira e gás, e os astrônomos brasileiros estão equipados para desbravar o lado oculto da Via Láctea. O país atualmente dispõe, por exemplo, de tempo nos telescópios com boa visão dos raios infravermelhos – uma das formas de luz com mais facilidade para atravessar gás e poeira, uma vez que possui comprimento de onda maior do que o tamanho dos grãos de poeira.

Com isso, os astrônomos podem, por exemplo, localizar regiões de nascimento de grandes estrelas, que sempre se formam nos braços espirais e, indiretamente, dão uma ideia de onde estão localizados. Os grupos de pesquisa

Cefeida: estrela pulsante que obedece a uma relação definida entre o período e a luminosidade. As mais luminosas têm períodos mais longos.



brasileiros utilizam principalmente os telescópios SOAR e Gemini nessa tarefa. Ao lado disso, tentam observar, não as próprias estrelas, mas a concentração de hidrogênio ionizado pelas estrelas muito quentes, chamado HII, que é muito comum nas galáxias espirais e tende a se concentrar nos braços. Portanto, o mapa do gás também fornece indícios importantes sobre a estrutura galáctica. Essa busca poderá ser feita de um modo ainda melhor com o grande conjunto de radiotelescópios Alma, em construção no Chile, mas que ainda não conta com participação brasileira.

Os astrônomos também procuram analisar a velocidade das estrelas da Via Láctea de forma bem detalhada, o que lhes pode dar uma ideia de sua trajetória no passado. Nesse caso, é útil estudar objetos muito interessantes, chamados aglomerados abertos, que são grandes “bolas de estrelas”, nascidas nos braços espirais. E há sinais de que os aglomerados recebem um impulso dos braços espirais quando estes nascem. Se é assim, o

movimento das “bolas de estrelas” pode dar uma pista sobre a possível perturbação criadora dos braços. Os telescópios gigantes da nova geração deverão encontrar um bom número de aglomerados abertos mais distantes, já que a amostra atualmente disponível situa-se num entorno de três mil anos-luz do Sol – e a Via Láctea é muito maior, com um diâmetro de 90 mil anos-luz.

Outra pista são as Cefeidas, que são estrelas pulsantes – elas incham e encolhem regularmente, e ao mesmo tempo seu brilho aumenta e diminui em escalas de tempo de poucos dias. Essas oscilações permitem deduzir o brilho próprio das Cefeidas, e a partir daí deduzir se estão mais próximos ou mais distantes, conforme pareçam mais ou menos apagadas daqui da Terra. O LSST deverá fazer uma vigilância de grandes áreas do céu, medindo o brilho das estrelas dessas áreas de três em três dias. Assim poderá descobrir as que estão pulsando como Cefeidas e deduzir as distâncias das áreas em que cada Cefeida se encontra.

galáxias mais maduras tendem a ter mais átomos pesados

Em seguida, tenta-se medir as velocidades das estrelas de cada região através de espectroscopia, com os telescópios do Observatório do Pico dos Dias, SOAR e Gemini. Aos poucos vai-se montando um panorama dinâmico de diferentes partes da galáxia. Distâncias e velocidades precisas são as informações necessárias para se determinar melhor a curva de rotação da Via Láctea, que é um dado básico para poder determinar a massa total da galáxia e estimar a quantidade de matéria escura.

Uma característica importante das galáxias é a sua metalicidade, que é a quantidade de átomos mais pesados que o hidrogênio e o hélio e sua distribuição por todo o volume galáctico. O hidrogênio é, ao mesmo tempo, o elemento mais comum, mais simples e mais leve que existe: todos os outros átomos são feitos a partir do hidrogênio dentro das estrelas, que, quando explodem, espalham os novos átomos pelo espaço.

Com o tempo, a gravidade volta a reunir essas partículas soltas: elas se

agrupam em nuvens, que então se contraem e formam novas estrelas. Portanto, galáxias mais maduras tendem a ter mais átomos pesados. À medida que a galáxia envelhece, suas estrelas tendem a ficar mais ricas em átomos pesados em comparação com o hidrogênio.

A metalicidade depende muito dos braços espirais, que têm papel determinante no nascimento de novas estrelas nas galáxias espirais, como a Via Láctea. De fato, observa-se, por exemplo, que regiões de rápida formação estelar ficam, ao mesmo tempo, mais ricas em oxigênio interestelar (disperso no espaço entre as estrelas). O oxigênio, por sua vez, provém principalmente de supernovas conhecidas como de tipo II, que estão associadas tanto aos braços espirais quanto à formação de estrelas massivas (com massa mais de dez vezes maior que a do Sol, nesse caso). Nessa linha de raciocínio, quando se observa material interestelar rico em metais, deslocando-se à mesma velocidade que um braço, isso é sinal de que ambos estão há bastante tempo jun-

Não se sabe do que é feita a matéria escura

tos, ou seja, que o braço é uma estrutura de longa duração.

Em resumo, a soma desses vários tipos de informação pode levar a uma visão completa da estrutura da Via Láctea. E isso não é tudo, porque mesmo nas regiões mais próximas do Sol ainda existem muitas estrelas que nunca foram estudadas, porque são muito fracas. Isso agora pode ser feito com novos instrumentos, que são capazes de ver até as estrelas mais fracas num raio de quase mil anos-luz em torno do Sol. Essa contagem vai levar a um número mais preciso da densidade estelar da galáxia, isto é, o número total de estrelas dividido pelo volume total da Via Láctea.

Dados mais precisos sobre a densidade de estrelas ajudam a entender outras estruturas além dos braços espirais, como o bojo, o disco, o halo e a barra da galáxia. Também se pode usar esses dados para checar um componente intrigante das galáxias: a matéria escura. Não se sabe do que é feita a matéria escura porque, como diz o nome, ela não

emite luz. Mas sabemos que ela existe por causa dos seus efeitos gravitacionais: a matéria escura faz as galáxias girarem mais depressa do que girariam se só tivessem estrelas, por conterem mais energia. Dados melhores sobre a densidade estelar da Via Láctea permitem calcular mais precisamente sua rotação. Comparando esse número com a rotação que se observa na prática, deduz-se o efeito da matéria escura: quanto maior a rotação, maior a massa de matéria escura escondida na galáxia.



Omega Centauri: as estrelas de aglomerados globulares como este, formaram-se todas juntas há 12 bilhões de anos. Parecem joias no espaço. Poucos objetos celestes são mais impressionantes. Nesta imagem veem-se parte dos dez milhões de astros-irmãos do aglomerado. (Crédito: NASA e ESA/HST)

Capítulo 5

Populações estelares

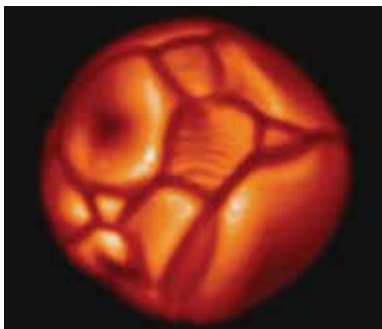
Cada uma das grandes estruturas das galáxias tem sua própria população de estrelas, e para entender a estrutura é preciso conhecer bem as suas populações estelares: identificar as características próprias das estrelas que pertencem às componentes principais, que são o bojo, o halo e o disco, este último incluindo os braços espirais. Esses dados são básicos e têm de ser determinados com muito mais detalhes do que os disponíveis até agora. Daí a importância de um estudo recente, feito por um grupo brasileiro, que identificou 340 novos aglomerados de estrelas situados no disco da Via Láctea.

O número de aglomerados conhecidos simplesmente dobrou depois desse estudo, indicando o quanto falta investigar para termos uma visão mais completa da Galáxia em que vivemos. Os astrônomos brasileiros podem ajudar a ampliar o conhecimento nessa linha de pesquisa. Ainda em 2009, por exemplo, grupos brasileiros devem começar a analisar os dados obtidos de uma nova busca

de aglomerados desconhecidos, por meio de raios infravermelhos, com o telescópio Vista, do ESO, Observatório Meridional Europeu, que vai observar o bojo da Via Láctea e as áreas próximas do bojo. E há brasileiros envolvidos numa investigação a ser feita pelo telescópio Vista sobre as Nuvens de Magalhães, duas pequenas galáxias satélites da Via Láctea.

Numa outra vertente dessa pesquisa, os brasileiros devem usar os telescópios Gemini, VLT e SOAR para obter dados espectroscópicos de diferentes populações de estrelas. A espectroscopia, que é a decomposição da luz em suas cores básicas, fornece pistas sobre a composição química das estrelas, entre outras coisas. Nesse caso, interessa saber a metalicidade específica das diversas populações estelares. Em particular, busca-se determinar a metalicidade, expressa como a quantidade de ferro existente numa estrela em relação ao hidrogênio.

A evolução química, por sua vez, está ligada à dinâmica da galáxia, ou



Betelgeuse: a imagem mais nítida de uma estrela supergigante. Se colocada no lugar do Sol, preencheria a órbita de Júpiter. O gás quente, proveniente do interior da estrela, emerge no centro das células convectivas, esfria-se e mergulha em suas bordas. (Crédito: NASA/HST)

seja, à sua forma e aos movimentos das estrelas. Daí a necessidade de comparar diversas informações sobre metalicidade em populações estelares distintas – inclusive em outras galáxias – para se construir teorias mais precisas sobre a evolução da química do universo.

Essa é uma área em rápido desenvolvimento. Existe um esforço para montar modelos teóricos que expliquem, de maneira mais geral, a complicada distribuição de elementos químicos por todas as regiões e estruturas da Via Láctea. Vale ressaltar que essa complexidade é um dado recente. Há poucos anos não se imaginava que a galáxia fosse uma “fábrica” tão rica e diversa de elementos químicos.

Uma fonte importante dos dados disponíveis nesse campo tem sido a observação das próprias estrelas, de um lado, e, do outro, das nuvens de matéria interestelar, com destaque para o hidrogênio II (ou HII). Esse gás tem papel proeminente porque é criado pela força da luz das grandes estrelas, que ar-

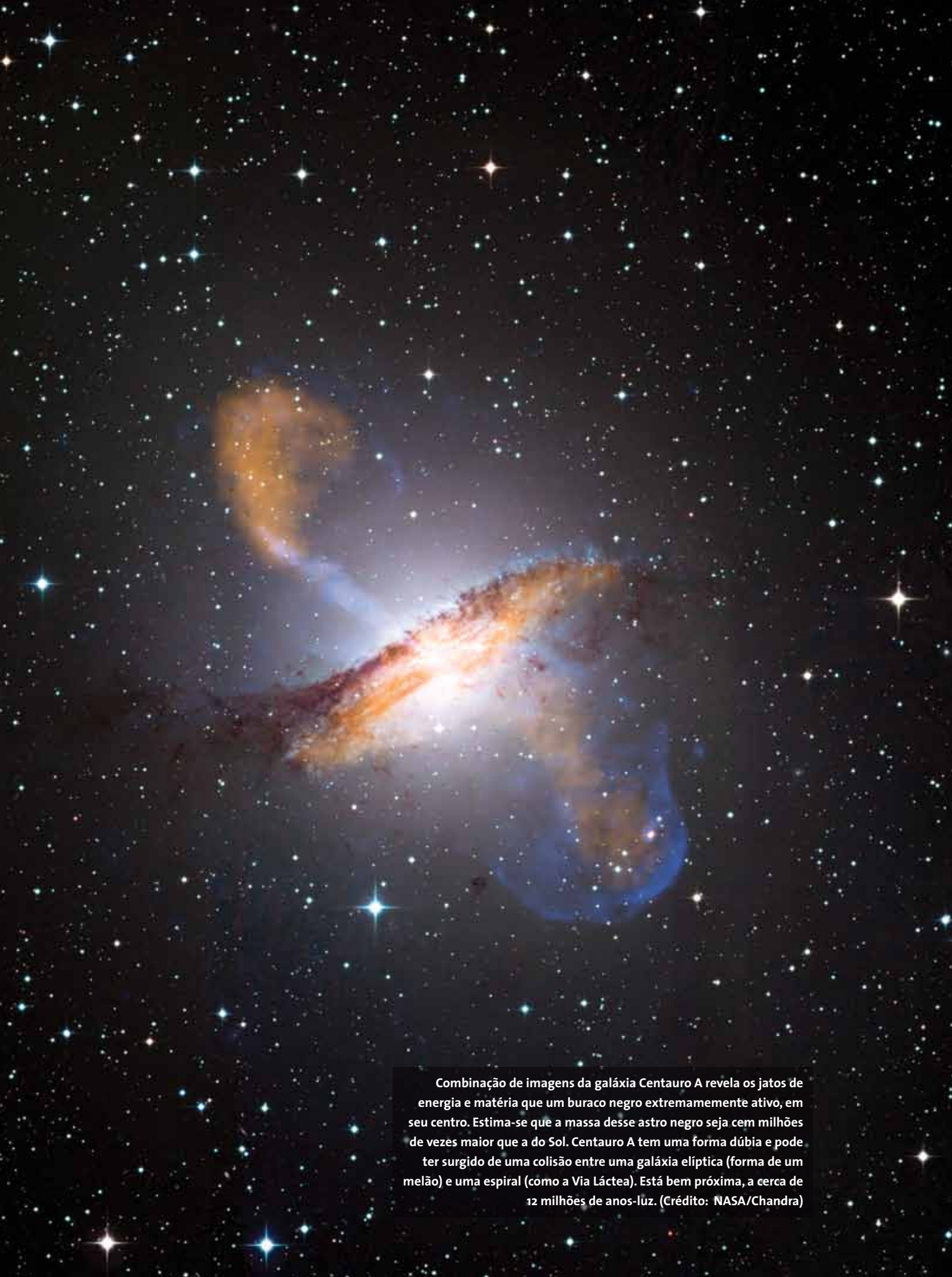
ranca elétrons do átomo de hidrogênio comum. Com isso, o hidrogênio torna-se ionizado e pode absorver e reemitir a luz das estrelas que o iluminam, ou seja, torna-se uma fonte importante de informação indireta sobre essas estrelas.

Com relação à observação direta das estrelas, conseguem-se dados úteis das estrelas do bojo galáctico. Do ponto de vista dos instrumentos, nos últimos anos, a astronomia brasileira começou a ter acesso aos chamados espectrógrafos multiobjetos, e essa facilidade vai aumentar quando entrarem em operação o modo multiobjetos do espectrógrafo Goodman, no telescópio SOAR, em 2010, e espectrógrafos similares nos Gemini. Esses instrumentos ampliam as possibilidades técnicas de observação da química estelar e galáctica.

Grupos brasileiros desenvolveram um método avançado para se decompor a luz das galáxias, chamado código Starlight. A decomposição – ou espectroscopia – da luz é feita em cada *pixel* de uma imagem, com a ajuda de equações

matemáticas próprias para essa tarefa, métodos de computação e modelos teóricos sobre a evolução das galáxias.

Mais de 500 mil galáxias já tiveram suas imagens esmiuçadas por meio do código Starlight, com bons resultados. Nesse caso as imagens foram feitas em luz visível e existe grande interesse em desenvolver teorias evolutivas com as quais se poderá ampliar a utilidade do código aplicado a imagens feitas em raios infravermelhos.



Combinação de imagens da galáxia Centauro A revela os jatos de energia e matéria que um buraco negro extremamente ativo, em seu centro. Estima-se que a massa desse astro negro seja cem milhões de vezes maior que a do Sol. Centauro A tem uma forma dúbia e pode ter surgido de uma colisão entre uma galáxia elíptica (forma de um melão) e uma espiral (como a Via Láctea). Está bem próxima, a cerca de 12 milhões de anos-luz. (Crédito: NASA/Chandra)

Capítulo 6

Galáxias e seus núcleos energéticos

Instrumentos com função específica invariavelmente abrem janelas para grandes descobertas na Astronomia. Um exemplo disso são os telescópios que utilizam óptica adaptativa, nos quais os espelhos ajustam-se automaticamente para melhorar a imagem dos objetos investigados, especialmente em relação aos “borrões” criados pela atmosfera. O resultado foi um grande impulso ao estudo das galáxias, nos últimos anos.

Outro exemplo foi o uso de grandes levantamentos de objetos celestes, fotografados às vezes aos milhares em uma só imagem, e em seguida analisados tanto do ponto de vista fotométrico (em que o que conta é a quantidade de energia luminosa) quanto espectroscópico (decompondo-se a luz emitida nas várias formas de luz que se misturam num raio luminoso). Dois exemplos de levantamentos são o SDSS e o 2MASS. O estudo das galáxias também se beneficiou muito desse tipo de ferramenta científica.

Um estudo crucial recente, por exemplo, mapeou as oscilações no bri-

lho de galáxias relativamente distantes, fornecendo, assim, diversas informações sobre elas e, indiretamente, sobre o aspecto que o universo tinha quando era mais jovem. Como a luz dessas galáxias demorou para chegar à Terra, por causa das grandes distâncias envolvidas, o que os telescópios veem é como um retrato do passado. Outro estudo recente importante examinou o centro das galáxias próximas, indicando que muitas delas têm buracos negros em seus núcleos, em maior proporção do que se pensava até agora.

Também se observou que mesmo galáxias de massa relativamente pequena podem ter buracos negros em seu núcleo. Além disso, os dados obtidos ajudam a investigar como esses objetos celestes evoluem, ou de que maneira destroem estrelas à sua volta, por força de maré. Outra descoberta importante feita na última década foi que novas galáxias podem ser formadas durante colisões de galáxias. Nesse caso, algumas que surgem do choque cósmico são do

tipo “galáxias anãs de maré”. Elas surgem do gás expelido das “galáxias-mães” durante a colisão, que também pode gerar objetos menores, como os aglomerados de estrelas. Os desastres galácticos não são muito comuns nas vizinhanças da Via Láctea, onde vemos eventos recentes, mas eles podem ter sido frequentes em épocas passadas da história do universo.

A óptica adaptativa é extremamente útil na investigação dos objetos criados por colisões galácticas, que são geralmente pequenos e exigem imagens de alta precisão, que mostrem detalhes da estrutura desses objetos e que deem boas indicações sobre sua natureza e suas propriedades. Já os levantamentos fotométricos e espectroscópicos possibilitaram o estudo das populações estelares das galáxias e tiveram um papel destacado no entendimento das estruturas mais amplas do próprio universo.

Até estruturas novas foram descobertas dessa maneira. São os chamados grupos fósseis de galáxias e os sistemas que estão “caindo” sobre outros

(como grupos de galáxias caindo sobre aglomerados de galáxias, ou aglomerados caindo sobre outros aglomerados). A óptica adaptativa logo vai incorporar espectrógrafos mais avançados, contendo centenas de fibras ópticas num mesmo aparelho. Novas descobertas devem acompanhar a ampliação dos levantamentos para áreas maiores do céu e distâncias maiores, ao mesmo tempo em que os instrumentos de óptica adaptativa tornam-se de uso mais comum.

O Brasil já tem acesso a instrumentos com óptica adaptativa (Altair, NIRI e NIFS) no telescópio Gemini Norte, e terá acesso também ao módulo SAM, no telescópio SOAR, a ser instalado em 2010. Dois instrumentos brasileiros estão em construção e serão acoplados ao SAM. Um deles é o espectrômetro SIFS (Espectrógrafo SOAR de Campo Integral), que decompõe a luz de um grande número de objetos celestes simultaneamente, por possuir uma unidade com 1.500 fibras individuais. O outro é um filtro de imagem, o BTFI (Imageador com Filtro Ajustável).

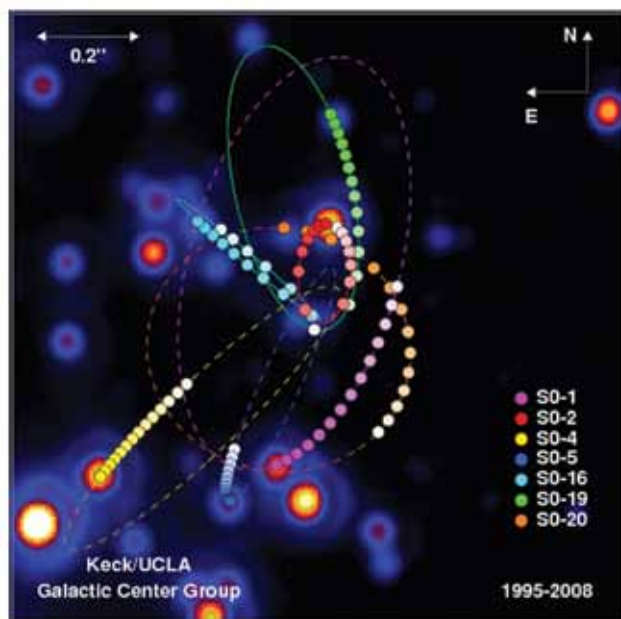


NGC 6217 é uma galáxia espiral barrada, com a barra muito maior que a da Via Láctea, mas com diâmetro de apenas 30 mil anos-luz. Seu núcleo brilhante não mostra atividade óbvia, mas provavelmente tem um buraco negro gigante dormente. (Crédito: NASA/HST)

Os dois instrumentos complementam-se. O primeiro fotografa uma parte relativamente pequena do céu de cada vez e tem uma capacidade média de decomposição da luz (decompõe os raios luminosos em um número razoável de “cores” distintas. Cobre boa parte das cores visíveis ao olho humano – o “espectro óptico”, numa expressão mais técnica. O segundo instrumento enxerga um pedaço relativamente grande do céu, tem boa resolução espectral (decompõe em muitas cores) e cobre uma parte relativamente pequena das cores visíveis. Ambos

utilizam tecnologia de ponta de espectroscopia tridimensional e devem entrar em operação em 2010.

A compreensão sobre a natureza dos núcleos das galáxias passou por uma revolução na década passada. Até então acreditava-se que o núcleo de algumas galáxias era perturbado pela presença de gigantescos buracos negros, cuja massa pode chegar a um bilhão de vezes a do Sol. De lá para cá se percebeu, no entanto, que também existem grandes buracos negros nas galáxias tranquilas, cujos núcleos não emitem



O centro da Via Láctea abriga um buraco negro supermassivo dormente. Ele se esconde atrás de densas camadas de poeira, mas vem sendo observado com alta definição pelo telescópio Keck. Esta imagem mede apenas um segundo de arco de lado. Esta figura mostra as órbitas de estrelas em torno dele, ao longo de 13 anos, permitindo determinar sua massa em quatro milhões de vezes a do Sol. (Crédito: UCLA Galactic Center Group)

energia em quantidade excepcional. Foi o que mostraram os instrumentos cada vez mais precisos que entraram em operação nas últimas décadas.

Entre eles, destaca-se o Telescópio Espacial Hubble e os grandes telescópios terrestres (não orbitais) dotados de óptica adaptativa, capazes de enxergar melhor os raios infravermelhos, como é o caso dos Gemini Norte e Sul. Analisando essas novas informações, concluiu-se que o nível de atividade dos núcleos galácticos depende da quantidade de matéria que cai nos seus buracos negros. Dá-se a isso o nome de regime de acreção, que ocorre da seguinte forma: nas galáxias ativas, o buraco negro central passa por um regime de engorda, com matéria caindo das proximidades, na forma de gás e poeira soltos no espaço ou perdidos de estrelas vizinhas. Esse material, ao cair, entra em órbita e cria um disco de acreção ultrabrilhante em torno do buraco negro gigante. Nas galáxias não ativas, o corpo escuro central está em jejum por falta de material cósmico capaz de alimentar um

disco brilhante. Em resumo, não existe diferença essencial entre galáxias ativas e não ativas, existem apenas fases distintas no regime de acreção. Mas ainda restam dúvidas sobre a atividade nuclear das galáxias. Uma das mais importantes é a geometria do disco: que formas ele pode tomar e que diferença isso pode causar em sua atividade?

Outra questão em aberto diz respeito à “ignição” da atividade do núcleo galáctico. Haveria um ou mais processos físicos que serviriam de “gatilho” da atividade? Um terceiro ponto a investigar é o trajeto da matéria que cai no buraco negro. Não está claro como ela se desequilibra, toma a direção do centro galáctico e acaba capturada pela imensa gravidade do buraco negro. Também é interessante medir até que ponto o buraco negro devolve matéria e energia para o espaço. Nessa conta somam-se a energia luminosa correspondente ao brilho do disco de acreção, os “ventos” de poeira e gás que sempre jorram dos núcleos

ativos, sem que se saiba muito bem o que os empurra, e os jatos de ondas de rádio que espiralam para fora do núcleo e se estendem geralmente muito além das fronteiras da própria galáxia. A última questão importante a ser respondida é como medir diretamente a massa dos buracos negros ativos. Isso tem de ser feito por meio do movimento das estrelas próximas: quanto maior o movimento, maior a gravidade do corpo escuro e, portanto, maior a sua massa. Quase todas as massas medidas até hoje pertencem a buracos negros de galáxias não ativas.

A forma exata dos discos de acreção, a primeira dúvida citada acima, não pode ser definida ao telescópio. Esses objetos são estudados por seu brilho total, que dá uma ideia das partes mais externas do disco, que é fino e opaco. Só agora começaram a surgir dados mais precisos sobre a largura do disco, ou seu raio interno. Os telescópios Gemini e SOAR vêm monitorando algumas galáxias com esse objetivo.

composto por 64 antenas de 12 metros de diâmetro cada uma

Algumas informações sugerem que a borda interna do disco – que fica próxima ao buraco negro – não é fina e opaca, mas grossa e transparente. Ela teria a forma de um anel de partículas ionizadas, formado por elétrons ou prótons. Essa hipótese ainda precisa ser verificada por instrumentos que captam ondas ultracurtas de rádio. Existe uma proposta de instalar antenas na Argentina – em um projeto chamado “VLBI milimétrico” – com o objetivo de cobrir essa lacuna. Essas antenas trabalhariam com as do radiotelescópio Alma, ainda em construção por diversos grupos estrangeiros, composto por 64 antenas de 12 metros de diâmetro cada uma, dispostas ao longo de 14 quilômetros.

Em relação ao trajeto da matéria que cai no buraco negro, a ideia é medir com precisão o movimento de massas de gás na região nuclear de galáxias não muito ativas, porque nesse caso os “ventos” não são muito fortes. Com isso, fica mais fácil identificar e analisar os movimentos que mais interessam: os que

levam em direção ao buraco negro. Esse trabalho tem sido feito com os Gemini, sugerindo que a matéria em queda forma espirais nas proximidades do núcleo (numa região de uns três mil anos-luz à sua volta). Nessa tarefa recorre-se à espectroscopia de campo integral (IFU), que dá uma visão em duas dimensões dos movimentos de matéria. A tendência é ampliar o número de galáxias observadas com esse fim, à medida que alguns dos novos instrumentos citados acima se tornem operacionais.

Para medir a massa dos buracos negros ativos diretamente, os astrônomos começaram a observar movimentos de estrelas em galáxias próximas, utilizando o Gemini, por meio de espectroscopia integral (IFU). Também se usa o NIFS do Gemini, observando raios infravermelhos, que permitem detalhar as imagens com precisão. Mais amplamente, busca-se determinar os tipos de estrelas existentes na proximidade dos núcleos galácticos.

Trabalhos apresentados até agora indicam que há muitas estrelas jovens ou

destino de cada “habitante” desse a agitado zoológico cósmico

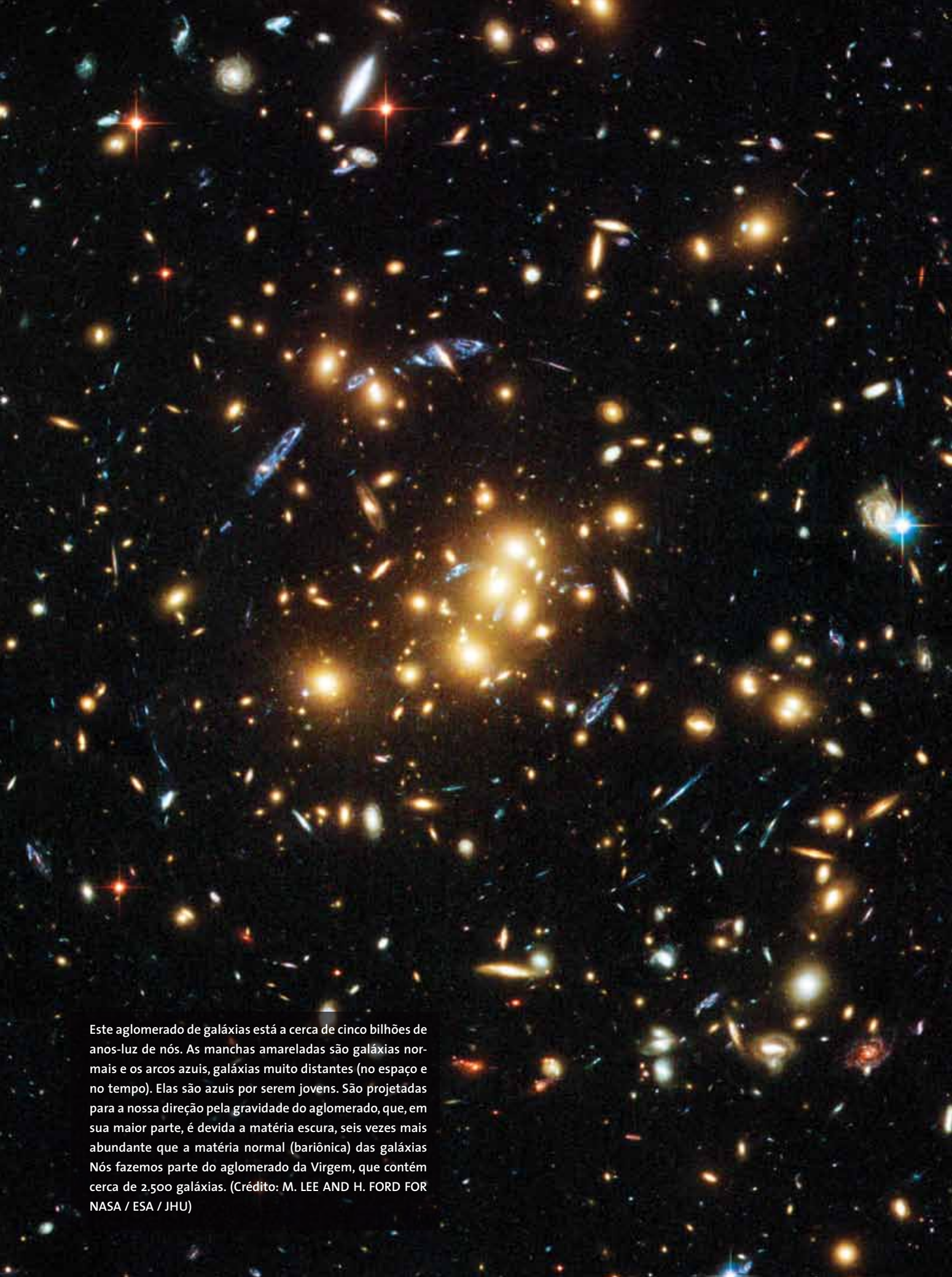
M83 é uma galáxia do tipo espiral barrada, a 15 milhões de anos-luz, na constelação de Hidra. Foi descoberta em 1752 no Cabo da Boa Esperança por Pierre Mechain. (Crédito: Rodrigo P. Campos OPD/LNA/MCT)



de meia idade nessa região. Nas galáxias de núcleo não ativo, as estrelas tendem a um perfil etário mais maduro. Isso indica que a atividade do núcleo pode disparar o nascimento de estrelas, mas os dados ainda não são suficientes para comprovar essa possibilidade.

Alguns grupos recorrem a técnicas sofisticadas para produzir um quadro

mais completo da evolução estelar nessas áreas, incluindo também a evolução química da matéria interestelar. Com isso espera-se ter uma ideia mais clara do movimento geral da matéria no local e desembaralhar a direção e o destino de cada “habitante” desse agitado zoológico cósmico.



Este aglomerado de galáxias está a cerca de cinco bilhões de anos-luz de nós. As manchas amareladas são galáxias normais e os arcos azuis, galáxias muito distantes (no espaço e no tempo). Elas são azuis por serem jovens. São projetadas para a nossa direção pela gravidade do aglomerado, que, em sua maior parte, é devida a matéria escura, seis vezes mais abundante que a matéria normal (bariônica) das galáxias. Nós fazemos parte do aglomerado da Virgem, que contém cerca de 2.500 galáxias. (Crédito: M. LEE AND H. FORD FOR NASA / ESA / JHU)

Capítulo 7

Estruturas em grande escala do universo

A forma e a evolução das galáxias depende em grande parte de estruturas muito maiores que elas, e que definem as características do próprio universo. Nessa escala de grandeza é que sobressaem personagens como a matéria escura e a energia escura – ambas distintas da matéria comum, que é feita de átomos. E ambas são muito mais abundantes: apenas 4% de toda a matéria do universo é do tipo comum, que conhecemos.

A matéria escura compreende cerca de 23% da massa total e o resto, mais de 73%, está na forma de energia escura. Essa última, além de desconhecida, tem um efeito intrigante porque, ao invés de contribuir para frear a expansão do universo, ela tende a acelerar o afastamento das galáxias entre si. Como não emitem energia, essas figuras exóticas não se deixam ver ao telescópio. Têm de ser investigadas a partir dos efeitos que causam sobre a matéria normal.

Antes de tudo, portanto, é preciso imaginar meios engenhosos de capturar

esses efeitos. Uma técnica útil consiste em mapear a radiação luminosa expelida no nascimento do universo, chamada radiação de fundo. Essa luz pode ser captada na forma de micro-ondas, que chegam à Terra de todas as direções do espaço. Apesar de o universo já ter quase 14 bilhões de anos, ainda guarda pistas sobre como as massas de átomos e partículas atômicas estavam distribuídas pelo espaço antes de surgirem estrelas e galáxias.

Dessa forma, dados coletados pelo SDSS, por exemplo, ajudam a colocar limites nas propriedades que a energia escura pode ter. De maneira geral, esses limites definem que tipos de partículas – tanto as conhecidas quanto as previstas em teoria – poderiam entrar na composição da energia escura.

Quanto à matéria escura, há tempos analisa-se se poderia ser feita de neutrinos ou de alguma outra partícula já conhecida. Os testes já feitos nessa linha reduziram mas não eliminaram as dúvidas, e agora está para começar uma checagem promissora, que cruza dados

de oscilações acústicas com os de uma investigação prestes a começar com o telescópio espacial Planck, lançado em 2009 pela agência espacial europeia.

Ele vai fotografar com grande precisão a luz que o universo emitiu durante seu nascimento explosivo – a chamada radiação de fundo do universo. Uma das ideias é verificar até que ponto a matéria escura interage com a energia escura. Outro objetivo é mapear as maiores estruturas luminosas do universo, que são os superaglomerados de galáxias. Eles reúnem as estruturas imediatamente inferiores em tamanho, os aglomerados de galáxias, alguns deles contendo milhares de galáxias.

Qual é a situação dinâmica dos superaglomerados? Eles estariam em movimento ou em rotação? Como seria o colapso gravitacional de objetos tão desproporcionais?

Acredita-se que as maiores estruturas estáveis, no universo atual, sejam os aglomerados de galáxias, e que os superaglomerados estariam “colapsando”

sobre si mesmos. O universo é muito mais dinâmico do que parece: suas estruturas crescem e desmancham o tempo todo. As estrelas massivas, por exemplo, crescem agrupando matéria solta, depois colapsam sob seu próprio peso e explodem lançando matéria pulverizada para o espaço.

Mas os superaglomerados podem estar num caminho sem volta, pois estão sendo acelerados pela expansão geral do cosmo. Então, mesmo que tenham uma tendência a desmoronar sob a própria gravidade, o impulso de expansão pode prevalecer. Seja como for, graças aos seus imensos tamanhos, eles têm papel decisivo na evolução do universo. Em vista disso, é necessário medir com mais precisão as propriedades básicas de cada um deles.

Nesse mesmo projeto também serão estudados os filamentos – compridas “filas” de galáxias que costumam ligar os aglomerados dentro de um superaglomerado qualquer. Como os filamentos afetam a evolução e a estrutura

Grupo de galáxias Quinteto de Stephan. Devido à proximidade e constante movimento das galáxias nos aglomerados, elas se fundem e acabam gerando galáxias maiores, de forma elíptica. (Crédito: NASA/HST)



dos aglomerados? A proposta aqui é fazer a investigação tanto por meio de luz visível, para analisar as galáxias, quanto por meio de raios X, que fornecem dados sobre o gás quente que permeia os aglomerados e filamentos.

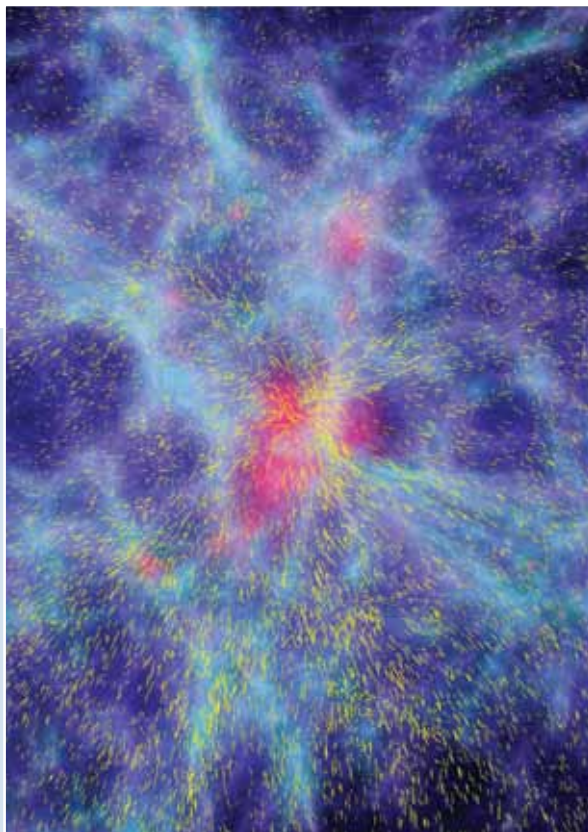
Observações e análises indicam que, além dos filamentos, também existem “muros” de galáxias conectando os aglomerados nos superaglomerados. O novo estudo pretende focar em filamentos que já foram analisados em raios X pelo satélite XMM-Newton e cruzar os dados com os catálogos de galáxias SDSS e 6dF.

Ao mesmo tempo pretende-se pesquisar entre as galáxias do SDSS para checar se há sinais de que estão conectadas em aglomerados ou superaglomerados (o 2DfGRS é outro catálogo útil nessa busca). Mais tarde a ideia é aprofundar essa investigação para saber se o fato de pertencer a uma estrutura maior influencia a vida interna das galáxias.

Essa influência deve ser avaliada a partir de certos dados preliminares.

De maneira geral, os aglomerados têm 20% de sua massa na forma de matéria comum, ou seja, gás e estrelas. Desse total, apenas um sexto da massa está confinada às galáxias. O resto encontra-se nos vazios entre as galáxias na forma de plasma (gás ionizado) que permeia o aglomerado todo.

Como é quente, apesar de muito rarefeito, o plasma exerce pressão sobre as galáxias. Estas, por sua vez, expõem metais e energia para o meio intergaláctico e enriquecem o plasma. Esse intercâmbio é conhecido há mais de duas décadas, mas os mecanismos precisos de troca ainda precisam ser esmiuçados. A temperatura do gás é um dos pontos que vêm sendo analisados. Como ele permanece quente?

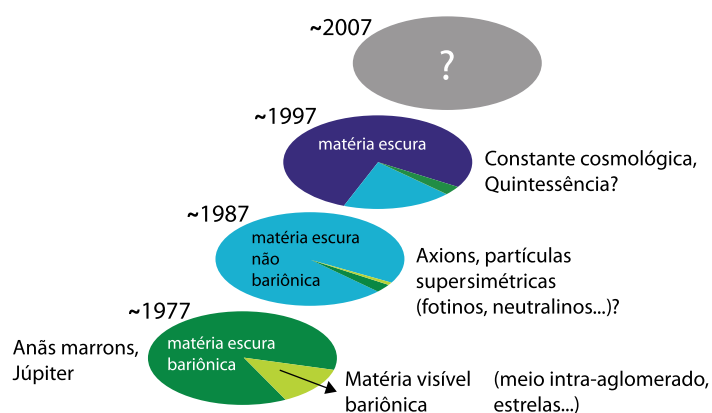


Estrutura em larga escala. O Universo é muito estranho quando se tenta observar uma quantidade muito grande de galáxias de uma vez só. Nessa simulação por computador se vê como elas se agrupam aos milhões e se movem (traços amarelos) em conjunto. As manchas vermelhas indicam onde a densidade de galáxias é maior, atraindo “rios” de galáxias com a força da gravidade. A imagem cobre um pedaço do Cosmo da ordem de cem milhões de anos luz. (Crédito: ESO)



Vasto conjunto de galáxias (marcadas em vermelho para facilitar a visualização). Elas provavelmente estão ligadas entre si pela atração gravitacional. Formariam, assim, um único objeto cósmico de tamanho inimaginável. Estão situadas a meio caminho dos limites observáveis do Universo: a sete bilhões de anos-luz. (Crédito: ESO)

Composição do universo



Até pouco tempo (1977) imaginava-se que toda a matéria estaria na forma de átomos – uma parte brilhante e outra escura, difícil de detectar. Hoje sabe-se que os átomos são apenas 4% do total: o resto pode estar na forma de partículas ainda não identificadas (23% do total) e a maior parte seria algo chamado de energia escura, sobre a qual não se sabe praticamente nada. A cada década se produz uma verdadeira revolução na cosmologia.

Acredita-se que seja aquecido por meio de algum mecanismo que transfira calor de regiões mais quentes das galáxias para as partes mais distantes e isoladas do plasma. Também pode-se verificar se o calor provém de colisões de aglomerados.

Alguns aglomerados têm na parte central uma galáxia elíptica gigante – as galáxias elípticas são mais esféricas, e não planas, como as galáxias espirais, e não têm braços. As elípticas grandes costumam conter uma fonte de rádio, sinal de que têm um núcleo ativo, que talvez possa servir de aquecedor para o plasma intergaláctico.

Uma ideia, então, é procurar conexões entre as características dessas galáxias centrais e as características gerais do plasma – e então verificar se as possíveis conexões ajudam a entender a temperatura do plasma. Não havendo uma elíptica central, pode-se escolher alguma galáxia particularmente brilhante dos aglomerados.

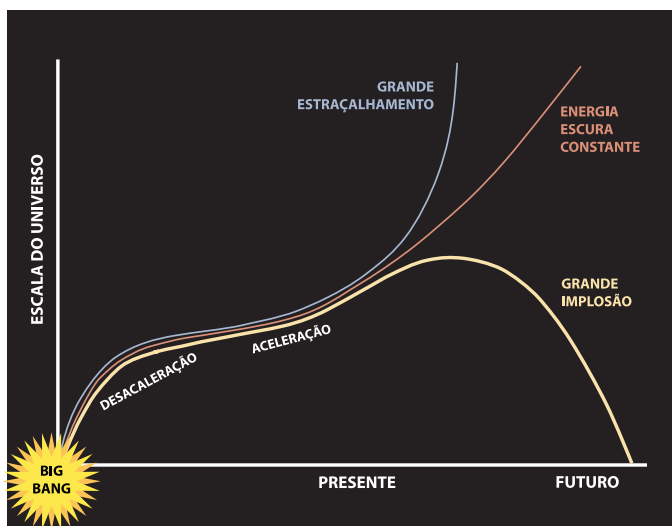
Entre as características interessantes do plasma, para esse tipo de com-

paração, estão a densidade, a temperatura e a abundância de metais. Conhecer as interações do plasma com as galáxias é útil para se entender os aglomerados individualmente. Além disso, é importante estudá-los coletivamente para compreender a formação das estruturas em escala cósmica.

Dentro do universo, os aglomerados são as maiores estruturas formadas pela simples atração gravitacional entre os seus componentes. Então devem ter influência sobre a evolução do universo por inteiro, cujo estudo – a cosmologia – deve se beneficiar dos dados obtidos com os futuros telescópios gigantes sobre aglomerados galácticos. Um dado com grande impacto potencial sobre a cosmologia é a função de massa dos aglomerados – isto é, como sua densidade varia quando sua massa aumenta.

Os aglomerados pequenos são particularmente úteis para o estudo dessa classe de objetos. Como têm poucas galáxias e a diferença de velocidade

O Universo vinha expandindo linearmente até há um bilhão de anos. Desde então, começou a se acelerar. Este gráfico indica como pode prosseguir a expansão do Universo: ele cresce, reduz o ritmo e acelera. No futuro, ele pode voltar a encolher ou acelerar mais, dependendo da quantidade de matéria que contém.



entre elas não é grande, eles formam um ambiente propício a colisões galácticas. Com isso fica mais fácil estudar as relações das galáxias com o plasma.

Prevê-se para a próxima década realizar grandes levantamentos de aglomerados galácticos pequenos, tanto por meio de luz visível quanto por raios infravermelhos. Alguns levantamentos previstos são o DES (Dark Energy Survey), o Kids-Vesúvio e, mais adiante, o LSST.

Um item relevante a se procurar nesses estudos é fazer medidas de massa por diversos métodos independentes. Também será útil verificar o papel de indicadores secundários, como a riqueza ou pobreza dos aglomerados em número de galáxias.

Quem estuda aglomerados de galáxias pode aproveitar um dos fenômenos mais interessantes do universo – as lentes gravitacionais. Elas podem ser comparadas com as lentes de vidro, que aumentam ou diminuem os objetos porque o vidro espalha ou concentra os raios de luz que transportam as imagens.

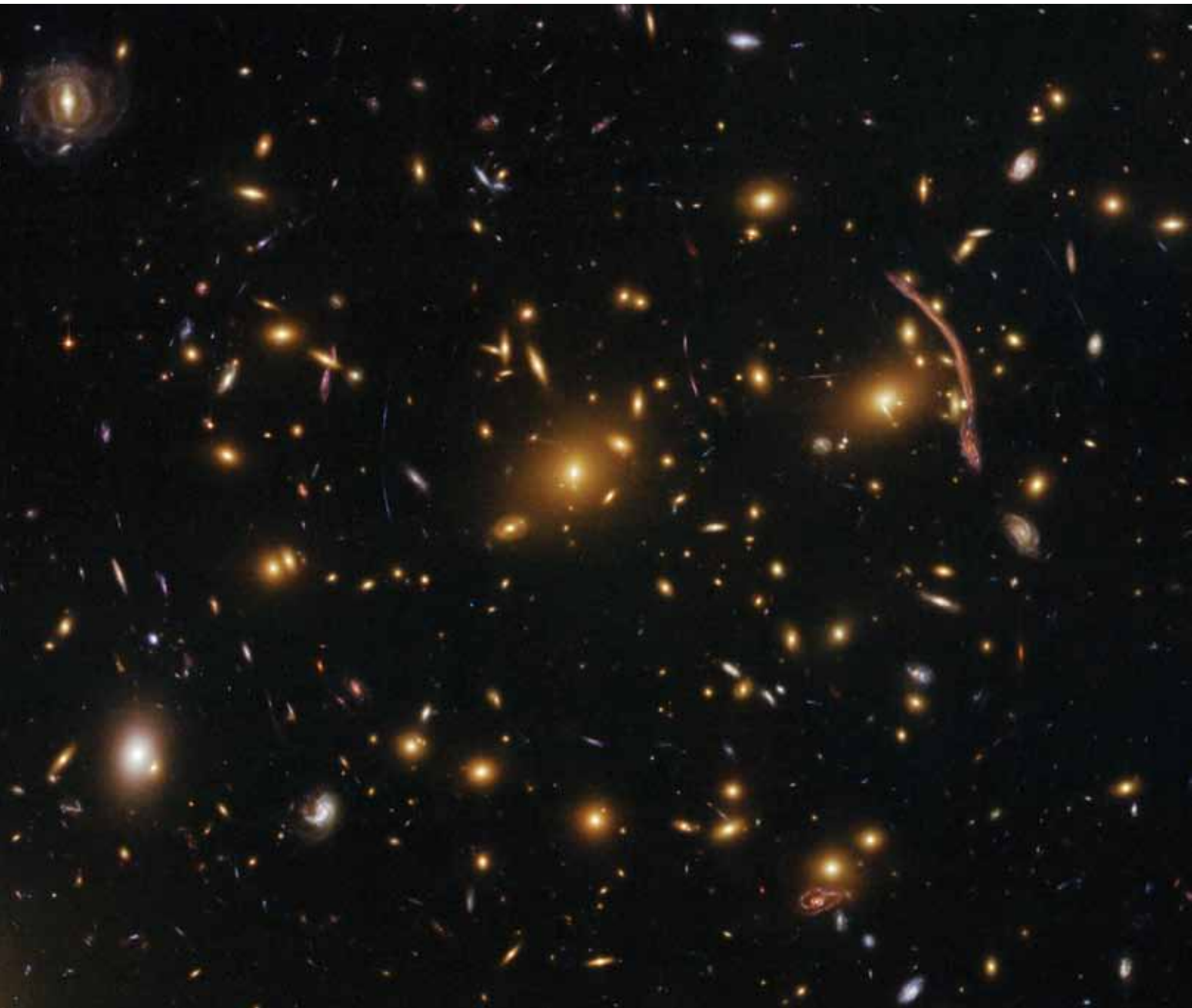
O mesmo acontece nas lentes gravitacionais, mas é a gravidade que faz a luz convergir ou divergir: se uma galáxia está na frente de outra, a gravidade da primeira pode curvar a luz que vem da segunda e aumentar ou diminuir sua imagem.

Em alguns casos, uma galáxia pode até duplicar ou quadruplicar a imagem de outra. Em suma, esses “telescópios naturais” permitem ver a uma distância que seria impossível com os atuais instrumentos da astronomia, e há um esforço para levantar o maior número possível de lentes gravitacionais.

A distribuição de lentes pelo céu é particularmente rica em informações sobre a matéria escura, mas também sobre a massa e o número de galáxias e aglomerados de galáxias distantes, sobre a geometria do universo e a história de sua expansão.

Estão em curso ou em planejamento vários projetos ambiciosos que aumentarão consideravelmente, nos próximos anos, o número de lentes co-

Lente gravitacional no aglomerado Abel 370. A estranha galáxia alongada (parte superior direita), que parece muito maior que as outras à sua volta, na verdade é um “fantasma”, uma imagem distorcida projetada em nossa direção pela lente gravitacional que encurva os raios de luz. Imagens como esta permitem medir a força da gravidade do aglomerado que produz a lente e mostrar que ela se deve à “matéria escura” em quantidade seis vezes maior do que das galáxias. (Crédito: NASA/HST)



nhecidas. Na próxima década, prevê-se a identificação de muitos milhares de lentes gravitacionais provocadas por aglomerados de galáxias.

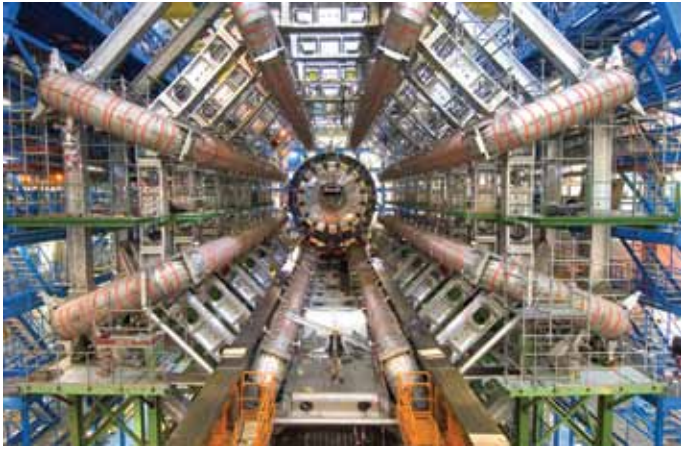
Para se ter uma ideia, até hoje ainda não se identificou uma lente forte associada a uma supernova (uma grande explosão estelar), mas os novos instrumentos poderão achar centenas de eventos desse tipo, entre outras raridades celestes. O uso de lentes para o estudo de aglomerados é interessante por várias razões, e, atualmente, mais de uma centena de aglomerados já foram analisados a partir dos efeitos que criam ao atuar como lente.

Esse campo de pesquisa já produziu um dos indícios convincentes da existência da matéria escura, pela análise do efeito-lente do aglomerado 1E 0657-558 (também conhecido como “aglomerado-bala”), e acredita-se agora que os levantamentos propostos poderão estabelecer um perfil extremamente preciso da matéria escura nos aglomerados.

A evolução e o destino do universo estão entre as questões mais candentes de toda a ciência contemporânea, e não apenas das ciências do céu, como a astronomia, a astrofísica e a cosmologia, pelo simples motivo de que o universo, em última instância, não reúne apenas estrelas e galáxias. É o lugar onde se procuram respostas para ideias fundamentais como o tempo, o espaço e a matéria.

E o que sabíamos a esse respeito passou por uma dramática mudança, em 1998, com a descoberta totalmente inesperada de que o universo não está apenas em expansão, mas vem crescendo de forma acelerada. A fonte dessa aceleração – designada pelo nome genérico de energia escura – permanece essencialmente desconhecida. Sabe-se apenas que alguma coisa está provocando a aceleração do universo e que, para ter o efeito que tem, essa coisa deve representar nada menos que 73% de toda a energia do cosmo.

Esse resultado decorre de uma avaliação dos números básicos usa-



O *Large Hadron Collider* do CERN é o mais poderoso acelerador de partículas já construído. Ele tem capacidade para elevar a densidade de energia a valores iguais aos do primeiro microssegundo depois do Big Bang. Nesse estágio, os glúons não conseguiam ainda confinar os quarks. Os experimentos talvez expliquem a existência da matéria escura, que forma 23% do Universo, e expliquem também por que matéria e antimatéria não aparecem em proporções exatamente iguais (assimetria). (Crédito: LHC)

dos para descrever o universo. Desses números, um dos mais importantes é a densidade, designada pela letra grega Ω (ômega), que mede a quantidade total de energia em relação ao volume total, normalizada pela densidade necessária para que a estrutura tridimensional do universo seja euclidiana, também chamada de plana, mas em três dimensões.

Outro número importante é a taxa de expansão cósmica, um indicador da velocidade com que as galáxias vêm se afastando umas das outras desde o início dos tempos. Essa taxa tem o nome de constante de Hubble, simbolizada pela letra H_0 .

A partir desses números é que se estima a proporção de energia escura e também se avalia a quantidade de outra forma de matéria desconhecida, chamada de matéria escura. A matéria escura é um pouco menos misteriosa, já que uma pequena parte dela, ao menos, pode ser feita de átomos ou partículas atômicas bem conhecidas, como prótons, elétrons e outras.

Essa parte pode estar, por exemplo, na forma de planetas ou estrelas colapsadas, e é geralmente chamada de matéria escura bariônica. As observações de microlentes gravitacionais indicam que essa contribuição é pequena: cerca de 2% na nossa galáxia.

E a parte não bariônica ainda não foi identificada. Acredita-se que seja feita de partículas ainda não descobertas, como o neutralino, o gravitino, monopolos magnéticos, previstos por uma teoria de interações das forças conhecidas, gravidade, eletrofraca e força forte, mas ainda especulativa, chamada supersimetria, mas que pode ser estudada pelo Large Hadron Collider, em teste no CERN, na Europa.

Determinar a natureza da matéria e da energia escuras (ou o “setor escuro”) é uma das questões mais relevantes da cosmologia atualmente. Existe um consenso de que essa meta não pode ser alcançada por um método apenas, ou apenas um tipo de observação. É preciso combinar diversos métodos e observações.

Um ponto de partida nesse estudo é que a energia escura comporta-se como uma espécie de antigravidade, no sentido de que tende a acelerar a expansão, ou seja, a afastar ainda mais as galáxias entre si, enquanto a gravidade faz o oposto – tende a agrupar as galáxias e a frear a expansão. Assim, procura-se medir esse efeito de antigravidade por meio de uma relação entre pressão e densidade da energia escura, designada pela letra w .

Qual é o valor desse número? Essa é uma meta central dos atuais projetos de pesquisa, e espera-se achar boas respostas com a ajuda do satélite EUCLID, da ESA Cosmic Vision, nos próximos anos. Antes de detalhar os métodos utilizados nessa pesquisa, é interessante notar que pode haver duas possibilidades bem diferentes a respeito da energia escura.

Uma possibilidade, já mencionada, é que ela seja composta por partículas exóticas que teriam essa propriedade nova, de atuar como antigravidade. Mas pode ser que a antigravidade seja um

efeito da própria teoria que descreve a evolução do universo – a teoria da relatividade geral, desenvolvida pelo alemão Albert Einstein (1879-1955) em 1916.

Portanto, talvez seja possível alterar a teoria de modo a incluir um efeito de gravidade negativa. Tal como está, atualmente, a teoria não prevê nenhum efeito desse tipo. Com certeza, essa é uma das primeiras questões a resolver com relação à energia escura. Isso se deve a uma teoria incompleta ou a algum personagem cósmico ainda não detectado?

Um meio de testar essa dupla possibilidade consiste em combinar dois tipos de observação. Um é o estudo já tradicional da expansão e evolução do universo por inteiro. O outro, menos tradicional, é o estudo do crescimento das estruturas “internas” do universo, especialmente na escala dos superaglomerados de galáxias.

Que efeito a aceleração cósmica pode ter sobre eles? Como esse efeito deve ser pequeno, geralmente é ignorado, mas ele pode fazer diferença quando

o objetivo é aumentar a precisão dos dados sobre a energia escura.

Foi o primeiro tipo de observação – que dá uma visão geral do cosmo, independente das suas partes – que levou à constatação da aceleração cósmica, em 1998, quando se tentou medir a taxa de expansão do universo em momentos diferentes de sua história.

Para isso mediu-se o afastamento entre galáxias mais próximas da Terra, representativas da época atual, e também entre galáxias distantes, que nós vemos tal como eram no passado (já que sua luz levou muito tempo para chegar até nossos telescópios. No universo, o que está longe pertence ao passado).

Essa comparação mostrou que a velocidade de afastamento era menor no passado, e o universo, portanto, estava acelerando sua taxa de expansão. Esse tipo de observação ainda precisa ser ampliado e aprofundado para se estimar com mais precisão o efeito antigravidade.

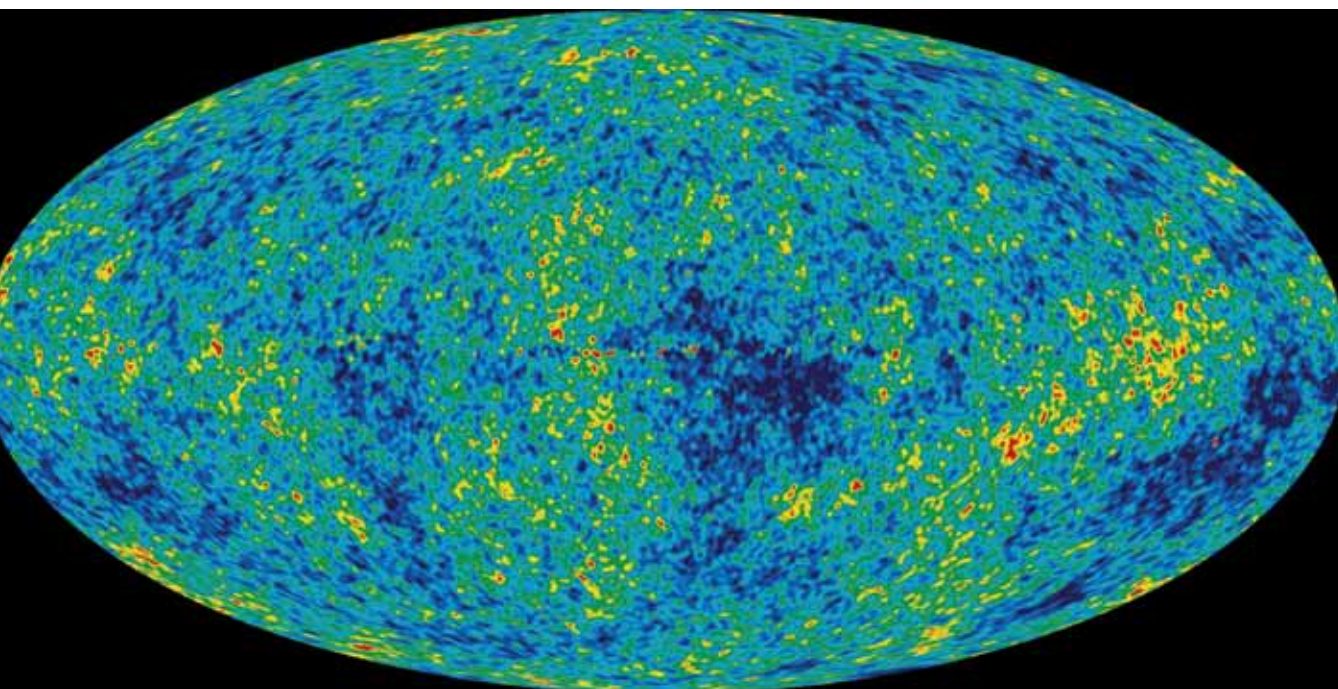
Nesse caso, é crucial monitorar as supernovas do tipo Ia (SNs Ia), que servem

de “régua” para medir a distância de galáxias longínquas. Atualmente, a técnica que emprega as SNs Ia é a mais poderosa ferramenta disponível para estudar a natureza da energia escura.

Os futuros telescópios gigantes deverão encontrar milhões de supernovas e dezenas de milhares do tipo Ia. Isso eliminará as incertezas estatísticas dos cálculos atuais, feitos com base em amostras relativamente pequenas de galáxias.

O desafio agora é reduzir os erros sistemáticos (devidos aos próprios instrumentos e técnicas de observação). É preciso descobrir meios mais livres de erro para fazer as observações.

Melhor dizendo, espera-se atingir grande precisão na medida de desvios de cor causados pelo movimento dos astros. Astros que se movem na direção do observador tornam-se mais azulados; os que se afastam ficam mais avermelhados. Nesse caso, interessa analisar desvios de cor nas SNs Ia. As medidas de cor poderão ser feitas aproveitando os



A região mais distante do universo que conseguimos ver é a que foi emitida quando a matéria se desacoplou da luz. O Universo tinha 380 mil anos de idade e as flutuações máximas de densidade entre um ponto e outro (representadas pelas cores) eram de apenas uma parte em dez mil. Em apenas 200 milhões de anos a matéria já havia se condensado em forma de estrelas. Essa condensação rápida só poderia ter ocorrido pela gravidade da matéria escura. (Crédito: NASA/WMAP)

telescópios Gemini e SOAR, ou, mais à frente, um telescópio robótico.

Paralelamente é preciso um esforço para entender melhor a evolução das grandes estruturas. Isso implica observar a organização das galáxias na escala mais ampla possível, na qual vê-se que elas formam “pacotes” monumentais, cada um com mais de 500 milhões de anos-luz de extensão. Isso equivale ao tamanho dos maiores superaglomerados, mas a concentração da matéria parece ser anterior às próprias estrelas e galáxias.

Ela teria começado quando havia apenas átomos dispersos no espaço e o

universo tinha menos de 400 mil anos de existência. A luz emitida pela matéria nessa época mostra isso, pois é mais “quente” em certos pontos do céu, indicando que foi emitida por matéria mais concentrada, e mais fria em outros, indicando regiões menos densas de matéria. Essa luz “fóssil” é que é chamada de radiação de fundo do universo (ver neste capítulo o tema: energia escura).

Antes das galáxias, portanto, o cosmo já tinha como que uma estrutura “pré-histórica”, que pode ter sido a “semente” dos superaglomerados de galáxias que hoje pontilham o universo em larga escala. Esse estudo começou

pela observação da própria radiação de fundo, mas agora o objetivo é observar as galáxias para aprimorar os dados disponíveis sobre a formação das estruturas cósmicas. Tenta-se medir o grau de concentração das galáxias para estudar a geometria e a quantidade de matéria do universo – aí incluídas a matéria escura e a energia escura.

O grau de concentração das galáxias nos superaglomerados fornece dados sobre o tamanho exato e a temperatura das concentrações primitivas de matéria, também chamadas de oscilações acústicas de bárions. Já se conseguiram informações importantes sobre a energia escura, nos últimos anos, por meio do estudo da concentração de galáxias vermelhas brilhantes fotografadas pelo SDSS. Resultados bem melhores podem ser esperados com as imagens dos telescópios da nova geração.

Há diversos outros meios de observar os aglomerados atuais de galáxias para aumentar a precisão dos dados sobre o universo primitivo. Um deles é o

chamado efeito Sunyaev-Zel'dovich, previsto pelos russos Rashid Alievich Sunyaev (1943-) e Yakov Borisovich Zel'dovich (1914-1987), no qual o gás quente que permeia os aglomerados modifica ligeiramente as intensidades da radiação de fundo.

O gás transfere energia para a radiação, aumentando a proporção de raios de luz mais energética na composição da radiação de fundo. Pode-se avaliar a força desse efeito medindo o brilho do gás quente na forma de raios X, e depois usar esse número para calcular, por exemplo, a taxa de expansão do universo, H_0 . Um objetivo importante do satélite Herschel, lançado em 2009, é medir essa taxa em milhares de aglomerados de galáxias e determinar o valor de H_0 com alta precisão (margem de erro de apenas 1%).

A imagem das galáxias mais distantes e primitivas muitas vezes é distorcida por lentes gravitacionais, ou seja, galáxias e aglomerados de galáxias mais próximos. Isso gera informação tanto sobre as lentes quanto sobre as grandes estruturas escondidas atrás delas. É pos-



A parte sul do Observatório Auger localiza-se na Argentina e destina-se a detectar chuvas de raios cósmicos ultraenergéticos (bilhões de bilhões de elétron-volts). Não se sabe ainda como e onde essas partículas cósmicas são aceleradas. Os eventos de energia ultra-alta são raros, demandando monitoramento em grandes áreas. O Pierre Auger cobre uma área de três mil Km² e é uma parceria entre 18 países, incluindo o Brasil. (Crédito: Consórcio Pierre Auger)

sível, então, pensar numa espécie de tomografia por “lentes gravitacionais”, mostrando toda a distribuição de matéria do universo. Isso pode ser feito por meio de um levantamento que cubra uma boa parte do céu em busca de imagens distorcidas dessa forma.

O mais interessante, nesse caso, é que o efeito de lente denuncia qualquer tipo de matéria, conhecida ou desconhecida. É diferente quando se mapeiam as galáxias, o que revela diretamente apenas a matéria brilhante, na forma de gás ou estrelas. A combinação desses dois métodos pode proporcionar o mais poderoso teste das teorias sobre a energia e a matéria escuras.

É muito importante combinar distintos métodos de observação para melhorar a precisão dos dados cosmológicos, isto é, que dizem respeito ao universo inteiro e sua evolução. Isso permite controlar os erros sistemáticos comparando os resultados de cada método em separado.

Praticamente toda a informação que se tem sobre o universo foi obtida por meio da luz, ou seja, pela análise das ondas eletromagnéticas: rádio, micro-ondas, raios infravermelhos, luz visível, luz ultravioleta, raios X e raios gama. Mas existem outros mensageiros que também transportam informações pelo cosmo. Os raios cósmicos, por exemplo, são partículas atômicas de altíssima

as ondas gravitacionais só foram

velocidade que aparentemente viajam grandes distâncias até baterem no alto da atmosfera terrestre, explodindo em um chuva de fragmentos.

Os neutrinos, partículas atômicas quase sem massa emitidas pelas estrelas aos borbotões, também são úteis. O Sol produz tantos neutrinos que, a cada segundo, 60 bilhões deles atravessam cada centímetro quadrado da Terra. Enfim, espera-se detectar as ondas gravitacionais, num futuro próximo. Elas ocorrem sempre que há grandes massas em movimento, mas principalmente quando há uma catástrofe, como a explosão de uma grande estrela. Neste caso, o espaço em torno da estrela “treme”, e esse tremor propaga-se pelo espaço como deformações.

Começando pelos raios cósmicos, uma sugestão recente é que eles se originam nos núcleos ativos das galáxias e, possivelmente, estão relacionados aos buracos negros existentes nesses núcleos. Para elucidar esse mistério – e talvez aproveitar as informa-

ções por trás dele –, construiu-se um grande observatório internacional de raios cósmicos na Argentina. Trata-se do Projeto Auger, do qual participam pesquisadores brasileiros.

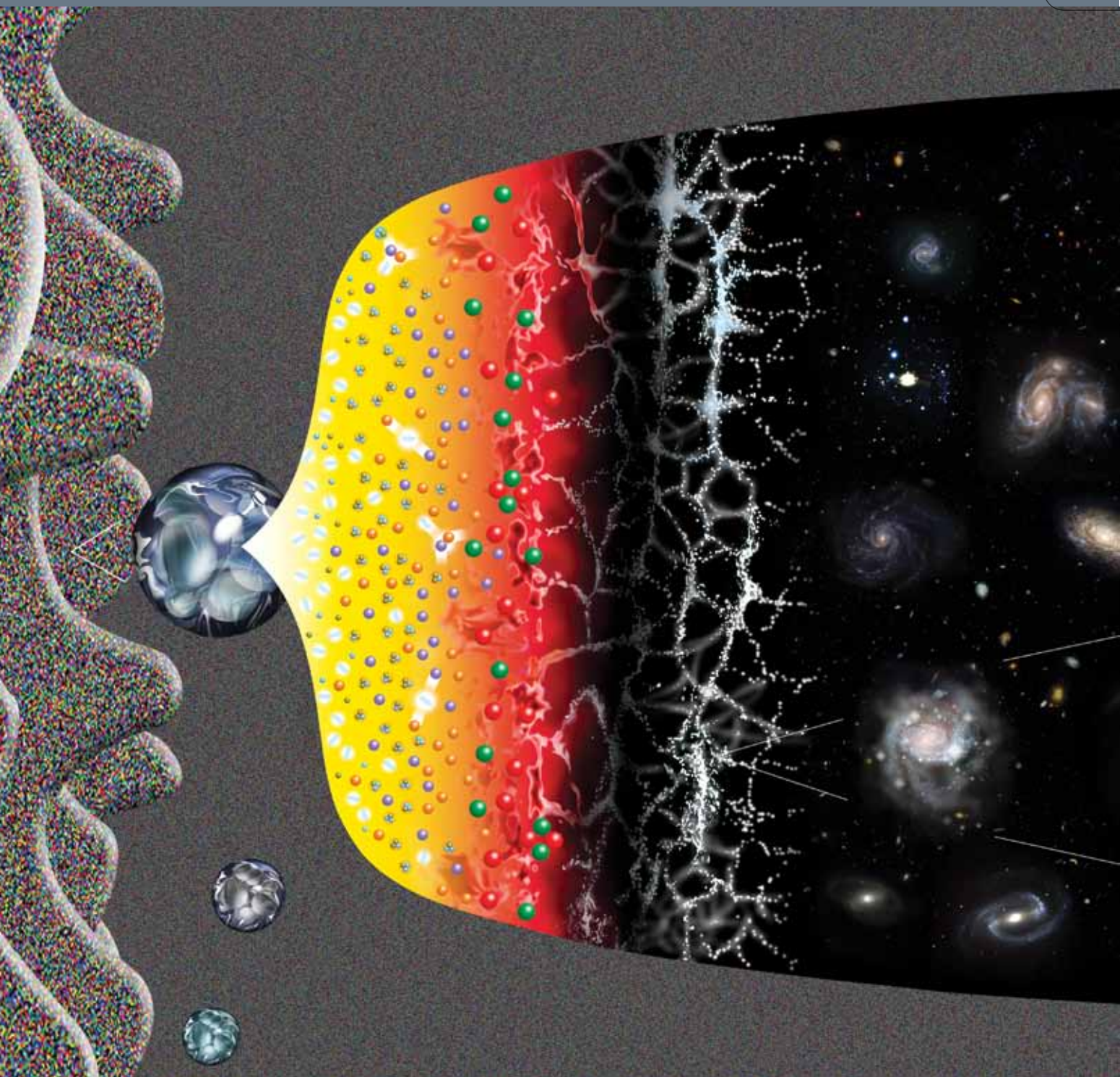
Quanto aos neutrinos, existe enorme dificuldade de detectá-los porque praticamente não interagem com o resto do cosmo. São como fantasmas: atravessam a Terra como se ela não existisse. Há poucos observatórios no mundo capazes de captá-los. Uma oportunidade boa ocorre quando uma grande estrela explode por perto, como foi o caso da supernova 1987a, que ficou visível em 1987 na Grande Nuvem de Magalhães, galáxia vizinha à Via Láctea, a 168 mil anos-luz de distância.

Quanto às ondas gravitacionais, elas foram previstas pelo alemão Albert Einstein. Elas são uma consequência da teoria da relatividade geral, criada por Einstein, que desde então se tornou a principal ferramenta de estudo do universo. Mas as ondas gravitacionais só foram comprovadas até agora de maneira

comprovadas até agora de maneira indireta

indireta, por meio de um sistema binário de estrelas de nêutrons, superdensas, que giram a velocidades tremendas muito perto uma da outra. A violência é tal que elas perdem energia na forma de ondas gravitacionais, tendendo a cair uma sobre a outra. O ritmo de queda é exatamente o mesmo que a teoria prevê.

A ideia agora é obter uma prova direta, por meio de detectores de ondas gravitacionais. Um dos detectores planejados está sendo construído no Brasil. É o Observatório de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg – Projeto Gráviton, em honra ao físico brasileiro Mario Schenberg (1914-1990). Consiste em uma esfera de cobre-alumínio de 65 centímetros de diâmetro, pesando mais de uma tonelada e resfriada a -273°C . Ela deve vibrar, se for atingida por uma onda de gravidade, e esta pequeníssima vibração poderá ser detectada.



A vida é uma das formas de organização da matéria. Ela requer estágios anteriores, como evolução molecular, evolução dos elementos químicos e das estruturas dos corpos em escala mais ampla. Ela é um subproduto do trabalho das forças cósmicas. (Crédito: A. Damineli e Studio Ponto 2D)

Capítulo 8

Universo, evolução e vida

Este painel ilustra as principais fases de evolução do universo. Como é impossível representar todas as etapas e suas diversas variantes defendidas por diferentes correntes científicas, aqui simplificamos em cinco fases. Abaixo, descrevemos com algum detalhe cada uma dessas fases. No topo da figura, colocamos alguns eventos marcantes, ao longo da linha do tempo.

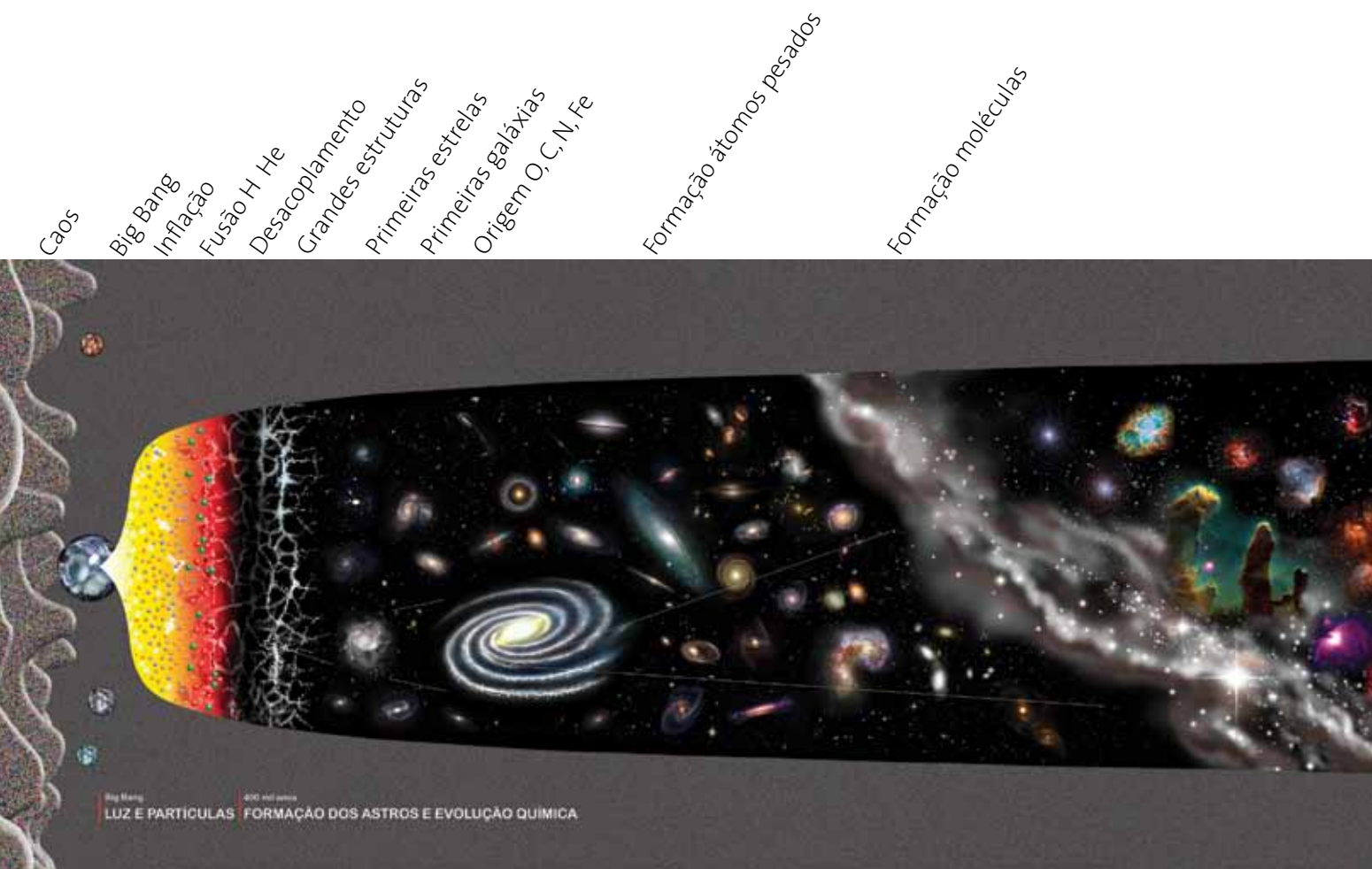
A. Fase dominada pela luz e partículas

É possível que existam muitos universos. O nosso nasceu há 13,7 bilhões de anos, numa grande explosão, o Big Bang. Uma gotícula de energia pura, infinitamente quente e densa, entrou em expansão e foi ficando cada vez mais fria e menos densa. A velocidade da expansão acelerou-se de forma inflacionária, só deixando uma ínfima parte do espaço dentro de nosso raio de visibilidade. Eras inteiras sucederam-se em frações de segundo. Matéria e antimatéria aniquilaram-se em forma de luz, restando apenas um bilionésimo da

matéria inicial e muita luz. Com a idade de três minutos, 10% do hidrogênio havia-se transformado em hélio. O universo era uma espécie de sopa uniforme, luminosa e não transparente (como uma lâmpada de gás). A luz não permitia a aglutinação da matéria. Aos 400 mil anos, a temperatura baixou para três mil graus e o plasma ionizado ficou neutro. O céu tornou-se transparente e escuro, como ainda é hoje.

B. Formação dos astros e evolução química

As tênues nuvens de gás desabaram sob o peso de sua própria gravidade, formando “rios” de matéria. Após 200 milhões de anos de escuridão (idade das trevas), formou-se a primeira geração de estrelas que reiluminaram o universo e aglutinaram-se em galáxias. O coração quente das estrelas passou a fundir os átomos menores em maiores. As grandes estrelas formaram o oxigênio; as intermediárias formaram o carbono e o nitrogênio. Aos dois bilhões



de anos, o universo já estava repleto desses átomos biogênicos. Aos cinco bilhões de anos, a tabela dos elementos químicos estava completa.

Átomos começavam a se ligar e formar moléculas, dentre as quais a água, uma das mais abundantes e antigas. Há 4,56 milhões de anos, na periferia de uma galáxia, a Via Láctea, uma nuvem de gás e poeira condensou-se e formou uma pequena estrela, o Sol, rodeada por um carrossel de planetas. No pequeno planeta rochoso situado na zona de água líquida, a Terra, a evolução mole-

cular se acelerou, produzindo estruturas cada vez maiores.

C. Evolução da vida na Terra

Nos oceanos, moléculas parecidas com o RNA adquiriram a capacidade de se replicar, dando início à vida. Em rápida evolução, ela encapsulou-se em células microscópicas. Há cerca de 3,8 bilhões de anos parece ter começado a atividade de fotossíntese, que injetou oxigênio na atmosfera terrestre. Há 2,5 bilhões de anos, quando apareceram as células com núcleo (eucariontes), a

Origem Sistema Solar
 Origem Vida
 Origem eucariontes
 Aceleração expansão
 Seres multicelulares
 Origem dos dinossauros
 Seres humanos
 Fim da biosfera
 Morte do sol



camada de ozônio já filtrava a radiação ultravioleta. Há 600 milhões de anos apareceram os seres multicelulares (macroscópicos). Há 440 milhões de anos as plantas saíram dos oceanos para colonizar a terra firme, logo seguidas pelos insetos e répteis. Os dinossauros, após dominarem a Terra por 200 milhões de anos, foram extintos, deixando espaço para os mamíferos evoluírem. Há seis milhões de anos, os hominídeos passaram a andar eretos, aprenderam a construir instrumentos e dominaram o fogo (há 400 mil anos).

Diversos ramos de hominídeos conviveram até cerca de 200 mil anos atrás. A vida é uma praga agressiva que ocupou todo o planeta desde seu início. Ela não só sobreviveu a catástrofes globais, como as aproveitou para se diversificar e gerar formas mais complexas.

D. Humanidade

O homem moderno surgiu há 200 mil anos, e há 50 mil anos desenvolveu a linguagem simbólica. Ao ensaiar as situações nesse espaço virtual para depois atuar no mundo concreto, obteve

Daqui a cinco bilhões de anos, o Sol inchará

enorme poder sobre a natureza. Há 28 mil anos já havia dizimado seus concorrentes mais próximos, os neandertais. A extinção de outras espécies continuou em grande escala até hoje, chegando ao esgotamento de recursos naturais. Ao inventar a agricultura, assegurou a abundância de alimentos e a população humana multiplicou-se rapidamente. Formaram-se as vilas e cidades, onde ocorriam ricas trocas de produtos e informações, resultando na invenção da escrita, da matemática, da ciência, da filosofia e das artes. O universo hoje fala pela nossa boca, enxerga-se pelos nossos olhos, conhece-se pelas nossas mentes. Cada ser humano tornou-se um universo em si, complexo e desconhecido. A evolução social cresce em ritmo acelerado. Enquanto isso, o maquinário lento e inexorável da evolução biológica continua a transformar nossos corpos. É impossível prever como serão nossos descendentes num futuro distante. Aparecerá algo mais surpreendente do que a linguagem simbólica? Não somos nem

o ápice nem o final da evolução, somos apenas uma espécie transitória.

E. Futuro

O Sol aumenta de luminosidade à medida que envelhece, aquecendo a atmosfera terrestre. Daqui a 700 milhões de anos a biosfera morrerá de calor. Talvez nossa ciência e tecnologia permitirão a nossos descendentes escaparem dessa tragédia planetária. No final das contas, a linguagem simbólica, que produziu tanta matança, talvez possa resgatar a rica experiência biológica e transportá-la através do vácuo cósmico para um abrigo seguro em algum planeta distante. Daqui a cinco bilhões de anos, o Sol inchará em forma de gigante vermelha, expelindo uma bela nebulosa planetária enquanto seu cadáver se contrai numa bola escura, milhões de vezes mais densa que o ferro. Impulsionado pela energia escura, o universo continuará expandindo-se de forma acelerada, ficando cada vez mais rarefeito, frio e escuro.

em forma de gigante vermelha



Nebulosa planetária M27: pequena estrela morrendo e ejetando átomos de Nitrogênio e Carbono para o meio interestelar. (Crédito: Rodrigo Prates Campos, OPD/LNA/MCT)

Neste universo em que os próprios astros são transitórios, a humanidade não é mais que um brevíssimo capítulo. Embora microscópica no tempo e no espaço, é ela quem conta essa grande história.



Telescópios Soar e Gemini, dos quais o Brasil é sócio.
(Crédito: A. Daminieli)

Capítulo 9

Astronomia no Brasil

Aspectos históricos

A astronomia brasileira, enquanto ciência institucionalizada e produtiva, é uma atividade recente. Ela desenvolveu-se a partir da implantação da pós-graduação, no início da década de 1970. Apesar disso houve iniciativas muito anteriores: o primeiro observatório astronômico no Brasil – na verdade, em todo o Hemisfério Sul – foi instalado em 1639 no Palácio Friburgo, Recife (PE), pelo astrônomo holandês Georg Markgraf (1616-1644). É notável que isso tenha acontecido apenas 30 anos após Galileu ter apontado a sua luneta para o céu. Esse observatório foi destruído em 1643 durante a expulsão dos holandeses, e mais tarde os jesuítas instalaram um observatório no Morro do Castelo, na cidade do Rio de Janeiro (RJ), em 1730.

Alguns anos após a declaração de independência, foi assinado por D. Pedro I, em 15 de outubro de 1827, o ato de criação do Imperial Observatório do Rio de Janeiro. Com a proclamação da

República, ele passou a ser denominado Observatório Nacional, uma das mais antigas instituições científicas brasileiras. No seu primeiro século de existência, o Observatório Nacional organizou e participou de diversas expedições científicas de astronomia, sendo a mais famosa a que confirmou a Teoria da Relatividade em Sobral (CE), em 1919, comandada por uma equipe inglesa.

No início do século XX construíram-se observatórios em Porto Alegre (RS) e São Paulo (SP), mas somente nas décadas de 1960 e 1970, com a construção de um telescópio de 60 cm no ITA, em São José dos Campos, e com a instalação de telescópios de 50 a 60 cm em Belo Horizonte (MG), Porto Alegre (RS) e Valinhos (SP), começaram realmente as pesquisas em Astrofísica no país. Nessa época chegaram os três primeiros doutores em Astronomia formados no exterior, e eles participaram da instalação dos programas de pós-graduação no país.

Paralelamente se inicia a construção do Observatório do Pico dos



Observatório do Pico dos Dias (Brazópolis-MG): formou gerações de astrônomos e permitiu a organização do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA/MCT), que coordena o acesso brasileiro a telescópios na faixa ótica e infravermelha. (Crédito: A. Damineli)

Dias, no qual foi inaugurado, em 1981, o telescópio de 1,60 m. Sua operação ficou sob a responsabilidade do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), criado em 1985. Esse foi, de fato, o primeiro laboratório nacional efetivamente criado no Brasil, e sua operação procurou seguir as melhores práticas internacionais em termos de gestão e utilização dos equipamentos. Com isso a comunidade astronômica desenvolveu-se e pôde dar um passo além, com a entrada no Consórcio Gemini, em 1993, e a formação do Consórcio SOAR, em 1998.

Outro fato importante aconteceu em 1974, quando foi instalado o radiotelescópio para ondas milimétricas, com diâmetro de 13,4 metros, em Atibaia (SP). Nesse radiotelescópio foram feitas as principais pesquisas em radioastronomia no Brasil. Mais tarde foi instalado o Telescópio Solar Submilimétrico, em El Leoncito, Argentina. No INPE foi construída uma rede de antenas (BDA – *Brazilian Decimetric Array*) com o objetivo de estudar o Sol com grande resolução

em ondas de rádio.

Na área espacial o Brasil tem participado, desde os anos 1970, de voos em balões estratosféricos levando equipamento para observar a radiação cósmica de fundo e fontes de raios X. Já no início do século XXI, astrônomos brasileiros participaram ativamente do planejamento e análise dos dados do satélite europeu CoRoT, responsável por estudar a sismologia das estrelas e os exoplanetas até pelo menos 2012. Esse experimento tem revolucionado nossos conhecimentos sobre os exoplanetas, a sismologia e a variabilidade estelar, e o Brasil tem os mesmos direitos científicos sobre os dados do satélite que os parceiros europeus. Trata-se de um tipo de cooperação bem sucedida que deve ser replicada no futuro.

Grupos de pesquisa

A pós-graduação teve um papel importante no sentido de impulsionar a formação de novos mestres e doutores

no país. Em 1981 o Brasil já contava com 41 doutores em Astronomia. Hoje existem 234 doutores, empregados em 40 instituições, além de 60 pós-doutores. Algumas instituições são bastante grandes, enquanto a maioria das instituições conta com apenas um ou dois profissionais. Com o início da pós-graduação, a produção científica brasileira na área da Astronomia também teve um grande desenvolvimento. No ano de 1965, ela praticamente não existia, pois não há registro de trabalho científico publicado em revista indexada. Já no ano de 1970, houve oito artigos publicados. Nos 30 anos seguintes (1970-2000) a taxa média de aumento anual de artigos publicados foi de 11,4%. Esse crescimento deve-se a diversos fatores, entre os quais:

- Retorno de doutores formados no exterior;
- Início da pós-graduação no Brasil;
- Contratação de profissionais por universidades e institutos federais de pesquisa;
- Instalação da antena de radioastronomia

Produção científica da Astronomia Brasileira

Artigos publicados em revistas indexadas por ano:

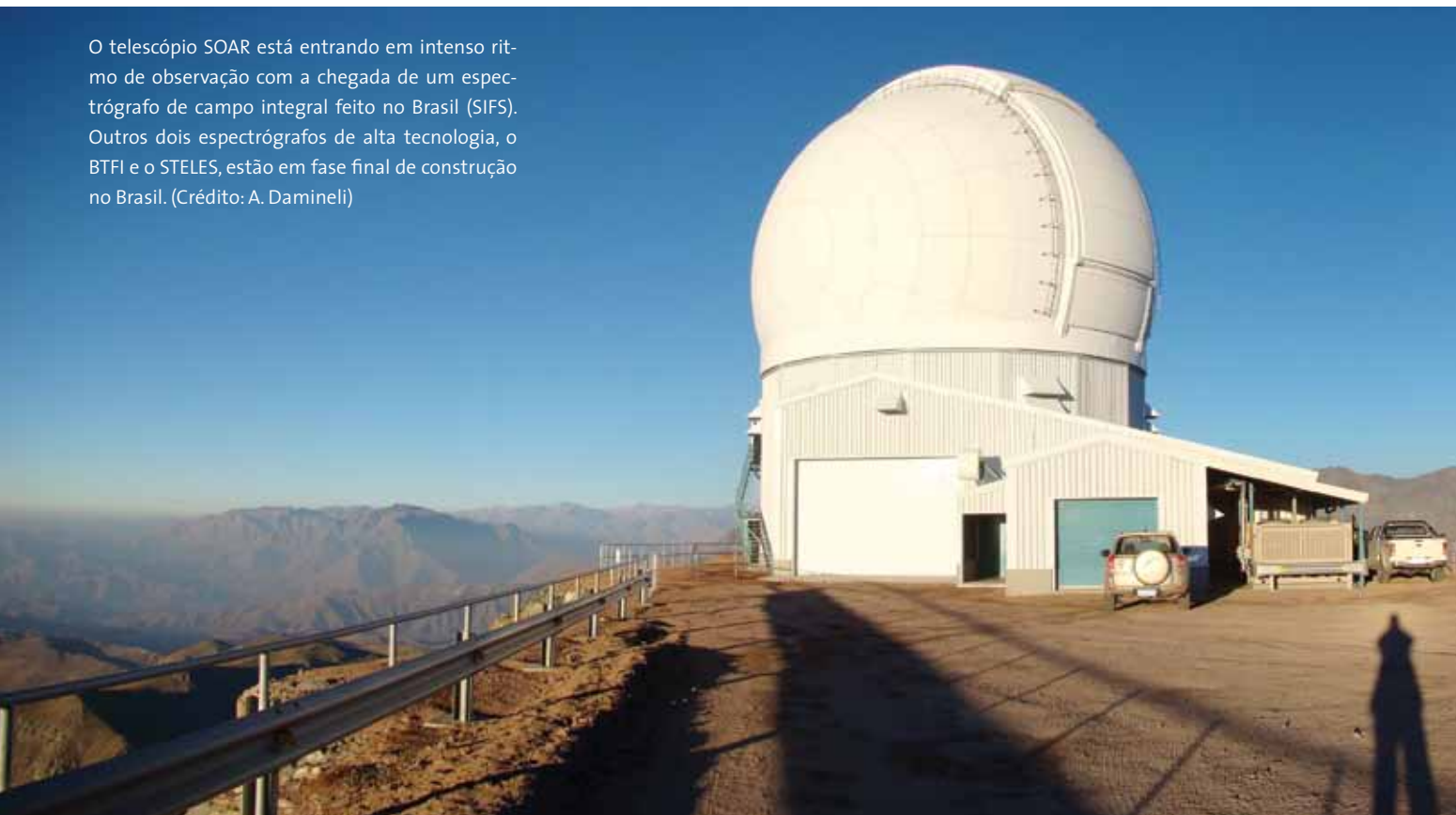
1965	0
1970	8
1975	15
1980	25
1985	47
1990	74
1995	111
2000	205
2005	214
2008	219

Taxa anual média de crescimento:

1970-2000	11,4%
2000-2005	0,9%
2005-2008	0,8%

de Atibaia e do telescópio de 1,60 m do OPD;
- O uso sistemático da internet deu aos pesquisadores brasileiros – antes isolados pelas grandes distâncias – muito mais capacidade de articulação e formação de networking nacional e internacional.

O telescópio SOAR está entrando em intenso ritmo de observação com a chegada de um espectrógrafo de campo integral feito no Brasil (SIFS). Outros dois espectrógrafos de alta tecnologia, o BTFI e o STELES, estão em fase final de construção no Brasil. (Crédito: A. Damineli)



Já nos anos de 2000-2008 essa taxa foi bem menor: 2,3%. Isso também se deve a diversos fatores:

- *O número de contratações de professores e pesquisadores nesse período foi muito pequeno; o quadro, estagnado, passou a envelhecer;*
- *A antena de Atibaia deixou de ser competitiva;*
- *Os telescópios do OPD, apesar de produtivos, eram competitivos apenas na área estelar, uma vez que novos e modernos telescópios, instalados em sítios muito mais adequados, passaram a dar apoio muito mais efetivo à astronomia extragaláctica;*
- *Muitos estudantes deixaram de procurar*

a área de astronomia.

Esse quadro está mudando. Diversos indicadores sugerem que a astronomia no Brasil está voltando a ter um crescimento mais dinâmico. Isso se deve aos seguintes fatores:

- *A entrada do Brasil nos consórcios Gemini e SOAR começou a dar resultados em ritmo crescente;*
- *Novos estudantes estão sendo atraídos para a área, em número e qualidade crescentes. São 90 alunos de mestrado e 130 de doutorado matriculados nos programas de pós-graduação;*
- *Novas contratações de profissionais têm sido feitas, principalmente em universidades;*
- *Novos grupos de pesquisa vêm se for-*

Distribuição dos artigos publicados pela astronomia brasileira no ano de 2008, por especialidade:

Área	nº artigos	%
Astronomia estelar óptica e infravermelha	63	28,8%
Cosmologia teórica	38	17,4%
Astronomia extragaláctica óptica e infravermelha	26	11,9%
Física de asteroides	12	5,8%
Astrofísica estelar teórica	9	4,3%
Evolução química de sistemas estelares	9	4,3%
Astronomia dinâmica	9	4,3%
Rádioastronomia solar	7	3,2%
Instrumentação	7	3,2%
Exoplanetas	6	2,7%
Outros	29	13,2%
Total	219	100%

mando em universidades nas quais não havia astrônomos até recentemente, inclusive universidades privadas;

- A descoberta da matéria escura tem motivado um grande número de trabalhos na área de Cosmologia Teórica, que hoje já é a segunda área mais produtiva;

- Outras áreas novas de pesquisa, como a Física de Asteroides e Exoplanetas, têm mostrado produção significativa.

Os maiores grupos de pesquisa em Astronomia estão concentrados na USP e nas universidades federais, UFRGS, UFRJ e UFRN, assim como nos institutos do MCT, no Observatório Nacional e no INPE. Todos eles mantêm programas de pós-graduação em nível de mestrado e

doutorado. No entanto, outros grupos menores também participam de programas de pós-graduação, quase sempre em conjunto com os programas de Física. São no total 16 programas que oferecem mestrado e 12 que oferecem doutorado em Astronomia.

As principais áreas de pesquisa são Astronomia Estelar (óptica e infravermelha), que produziu 30% dos artigos publicados em 2008; Cosmologia Teórica, com 17%; e Astronomia Extragaláctica, com 13%. Algumas áreas tiveram desenvolvimento bastante recente, como Física de Asteroides (6%) e Exoplanetas (3%). Essa última desenvolveu-se graças à participação do Brasil no satélite CoRoT.

	Com bolsa PQ-1	Com bolsa PQ-2	Sem bolsa PQ	Pós-doutor	Alunos Ms+Dr	Total
USP	17	4	16	18	65	120
ON	8	5	14	5	31	63
INPE	7	4	13	4	20	48
UFRJ(OV+IF)	1	7	11	1	18	38
UFRGS	7		3	3	13	26
UFRN	2	3	3	1	19	26
UNESP(FEG+RC)	2	2	5	4	11	24
CBPF	1	4	1	1	17	24
LNA(+SOAR)		1	8	4		13
UNIVAP		3	5	1	4	12
UFMG	1	1	3	1	5	11
UFSC	3		1	1	5	10
UESC		3	4	2		9
UNIFEI		1	2		5	8
UNICSUL		1	6	1		7
UFMS		1	2		4	7
Un. Mackenzie	1	3	1	1		6
UEFS			5			5
UNIPAMPA			3			3
UERN			3			3
UNB			3			3
UFPR		1	1			2
UFABC		1	1			2
Unochapecó			2			2
UFPeI			2			2
UEL			2			2
UNIFESP			2			2
CTA			2			2
UFF		2				2
UERJ			2			2
UCS		1				1
UNINOVE		1				1
UNIRIO			1			1
UNIVASF			1			1
UFJF			1			1
UEPG			1			1
UFMT			1			1
UFSCar			1			1
CEFET-SP			1			1
UTFPR			1			1
Fund.Sto. André			1			1
Exterior (pós doutorado)				11		11
Total geral	50	49	135	59	225	506

Obs: Bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq nível PQ-1 oferece bolsa + grant, renováveis a cada três anos; bolsa de nível PQ-2 não tem grant, e também é renovável a cada três anos.

Siglas (41 instituições)

USP - Univ. de São Paulo (SP) / **ON** - Observatório Nacional/MCT (RJ) / **INPE** - Inst. Nacional de Pesquisas Espaciais/MCT (SP) / **UFRJ** - Univ. Fed. do R. de Janeiro (RJ) / **UFRGS** - Univ. Fed. do R. Grande do Sul (RS) / **UFRN** - Univ. Fed. do R. Grande do Norte (RN) / **UNESP** - Univ. Est. Paulista Júlio de Mesquita Filho (SP) / **UNIFEI** - Univ. Federal de Itajubá (MG) / **LNA** - Laboratório Nacional de Astrofísica/MCT (MG) / **UNIVAP** - Univ. do Vale do Paraíba (SP) / **UFMG** - Univ. Fed. de Minas Gerais (MG) / **UESC** - Univ. Est. de Santa Cruz (BA) / **UFSC** - Univ. Fed. de Sta. Catarina (SC) / **UNICSUL** - Univ. Cruzeiro do Sul (SP) / **UFMS** - Univ. Fed. de Sta. Maria (RS) / **Un. Mackenzie** - Univ. Presbiteriana Mackenzie (SP) / **UEFS** - Univ. Est. de Feira de Santana (BA) / **UERJ** - Univ. Est. do R. de Janeiro (RJ) / **UNIPAMPA** - Univ. Fed. do Pampa (RS) / **UERN** - Univ. Est. do R. Grande do Norte (RN) / **UNB** - Univ. de Brasília (DF) / **UEL** - Univ. Est. de Londrina (PR) / **CBPF** - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT (RJ) / **UFPR** - Univ. Fed. do Paraná (PR) / **UFABC** - Univ. Fed. do ABC (SP) / **CTA** - Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial/MD (SP) / **Unochapecó** - Univ. Comunitária Regional de Chapecó (SC) / **UFPeI** - Univ. Fed. de Pelotas (RS) / **UNIFESP** - Univ. Fed. de São Paulo (SP) / **UCS** - Univ. de Caxias do Sul (RS) / **UFF** - Univ. Fed. Fluminense (RJ) / **UNINOVE** - Univ. 9 de Julho (SP) / **UNIRIO** - Univ. do Rio de Janeiro (RJ) / **UNIVASF** - Univ. Fed. do Vale do São Francisco (PE) / **UFJF** - Univ. Fed. de Juiz de Fora (MG) / **UEPG** - Univ. Est. de Ponta Grossa (PR) / **UFMT** - Univ. Fed. do Mato Grosso (MT) / **UFSCar** - Univ. Fed. de São Carlos (SP) / **CEFET-SP** - Centro Fed. de Ensino Tecn. de São Paulo (SP) / **UTFPR** - Univ. Tecnológica Federal do Paraná (PR) / **Fund. Sto. André** - Fundação Santo André (SP)



Espectrógrafo de campo integral SIFS na sua fase final de montagem no Laboratório Nacional de Astrofísica (MCT). Este é o primeiro de três espectrógrafos de alta tecnologia que o Brasil está fornecendo ao telescópio SOAR. (Crédito: Bruno Castilho, LNA/MCT)

Desenvolvimento de instrumentação científica

A Astronomia é uma ciência básica. Sua missão é nos dizer de onde viemos, onde estamos e para onde vamos. Seu objetivo é, pois, fazer avançar a fronteira do conhecimento. No entanto, ao longo de toda a história, essa ciência avançou *pari passu* com o desenvolvimento tecnológico. Muitas vezes beneficiando-se dele, muitas vezes promovendo-o direta ou indiretamente. Exemplos disso são tantos que seria tedioso enumerá-los.

Se o objetivo da ciência da Astronomia é fazer pesquisa básica, ela pode ser desenvolvida promovendo o desenvolvimento de instrumentação de ponta; dessa forma incentiva-se a cultura da inovação tecnológica. Isso se dá pelo treinamento de cientistas e técnicos em tecnologias emergentes, necessárias para a pesquisa astronômica de ponta.

A participação brasileira nos telescópios Gemini e SOAR viabilizou,

pela primeira vez, a construção efetiva de instrumentos modernos, de classe mundial, para grandes telescópios. Pretendemos concluir e comissionar os três instrumentos em construção e iniciar mais um instrumento brasileiro nos próximos três anos.

O canhão de laser do módulo de óptica adaptativa do Gemini Norte permite corrigir as distorções da turbulência atmosférica. (Crédito: Telescópios Gemini)





Da esquerda para a direita: Telescópios Subaru, Keck1 e Keck 2 (ao fundo), Gemini Norte (em primeiro plano) em noite de lua cheia, situados no topo do Mauna Kea (4250 m). Através de troca de tempo com o Gemini, o Brasil tem acesso aos outros três telescópios de classe de 8-10 metros. (Crédito: Telescópios Gemini)

Observatórios virtuais

O século XXI iniciou-se com uma verdadeira explosão de dados científicos em forma digital que está produzindo uma revolução na Astronomia. Devido a vários empreendimentos de grande porte, uma imensa quantidade de dados digitais de excelente qualidade, obtidos tanto do solo quanto do espaço, ficaram disponíveis. E isso é só o começo.

O acesso e a manipulação do volume dos dados já armazenados desde pelo menos as últimas duas décadas tornou-se um desafio para os pesquisadores que precisam analisar seus próprios dados experimentais e/ou buscar por outros, em arquivos e bancos de dados espalhados na rede. Se, por um lado, os contínuos

desenvolvimentos de *hardware* têm permitido, a custos relativamente modestos, a aquisição, o processamento e o armazenamento de centenas de *terabytes* de dados, os sistemas de *software* necessários para a manipulação desses dados ainda deixam muito a desejar. Esse é um problema reconhecido por todas as comunidades científicas e vários projetos de grande porte foram iniciados no sentido de encontrar soluções. No âmbito da comunidade astronômica, o nome genérico dessa solução é o Observatório Virtual (VO, do acrônimo em inglês).

Numa primeira aproximação, um VO é um sistema, acessado pela Internet, que provê ampla conexão entre dados arquivados e também ferramentas de extração e garimpagem de dados e, de maneira geral, de redução de complexidade.

Atualmente esse projeto encontra-se em franco desenvolvimento, sendo coordenado internacionalmente pela IVOA (*International Virtual Observatory Alliance*). O Brasil tornou-se membro do IVOA por meio da rede BRAVO (*Brazilian Virtual Observatory*) em 2009.

Ensino e divulgação da Astronomia

A Astronomia no primeiro e segundo graus

Astronomia envolve uma combinação de ciência, tecnologia e cultura e é uma ferramenta poderosa para despertar o interesse em Física, Química, Biologia e Matemática, inspirando os jovens às carreiras científicas e tecnológicas. Mais do que isso, mostra ao cidadão de onde viemos, onde estamos e para onde vamos.

Astronomia é a base para se adquirir uma noção sobre onde nos situamos no universo, assim como para a compreensão dos fenômenos naturais, como a duração do dia, que representa o período de rotação da Terra; a duração do

mês, que é baseada no período das fases da Lua, causadas pela órbita da Lua em torno da Terra; e do ano, período da órbita aparente do Sol em torno da Terra, causada pela órbita da Terra em torno do Sol. A Astronomia, por isso, é matéria dos níveis fundamental e médio, estando incluída na Lei de Diretrizes e Bases da Educação, no Plano Nacional da Educação, no Programa de Formação Continuada de Professores, nos Parâmetros Curriculares Nacionais e nas propostas curriculares estaduais.

A Astronomia consta dos currículos escolares do ensino fundamental na temática Terra e universo, já que o céu e o universo podem ser usados para despertar a imaginação e mostrar que o método científico pode ser usado mesmo para coisas que não podemos tocar. Mas há poucas iniciativas de disseminação de conceitos em Astronomia nesse nível de ensino. Possivelmente porque a formação de docentes de ciências constitui um gargalo grave, devido à dissociação entre sua forma-



O fascínio pelos astros se expressa no rosto desta jovem, que, como outros 2,3 milhões de brasileiros, acorreram aos 16 mil eventos oferecidos ao longo do Ano Internacional da Astronomia (2009). Esse gigantesco programa de divulgação científica foi oferecido por 160 grupos de astrônomos amadores e 80 instituições universitárias, planetários e centros de ciência. (Crédito: Centro de Estudos Astronômicos de Alagoas – Maceió)

ção básica e a diversidade de áreas a ensinar. No caso do ensino de ciências, o baixo número de especialistas atuando no magistério faz as escolas aproveitarem professores dos mais variados conteúdos para atuar na área.

A Olimpíada Brasileira de Astronomia, organizada pela Sociedade Astronômica Brasileira, já atinge mais de dez mil escolas do País, 75 mil professores e 860 mil estudantes, e tem sido uma ferramenta importante para difundir material didático e interesse pela astronomia a todos os cantos do país. As atividades do Ano Internacional de Astronomia em 2009, comemorando os 400 anos do uso do telescópio por Galileu, permitiu um acesso sem precedente da população a telescópios, palestras, notícias e eventos astronômicos. Mas a forma de ensino de Astronomia que atinge a maior parcela da população se dá nos planetários distribuídos pelo país, que, embora ainda sejam poucos, em vista da extensão do país, atendem regularmente a um

grande número de estudantes.

A Sociedade Astronômica Brasileira tem oferecido oficinas para professores de nível fundamental e médio. Desde 2009, têm sido realizados Encontros Regionais de Astronomia (EREA) que culminarão com um congresso nacional que objetiva oferecer aos órgãos governamentais (MEC) ações para melhorar a formação dos professores de ciências em Astronomia e a qualidade do conteúdo dos livros no ensino fundamental. No ensino médio, temas de Astronomia já são contemplados parcialmente na Física, mas precisam ser modernizados. Nesse nível de ensino, é possível usar o céu como um vasto conjunto de laboratórios de Física: cinemática e dinâmica, termodinâmica, física nuclear, relatividade. Algumas universidades, como a USP, têm programa de pré- iniciação científica, em que estudantes do segundo grau são tutorados por astrônomos profissionais, preservando vocações para a carreira científica.

Graduação e pós-graduação em Astronomia

Por que fazer um curso de Astronomia? O encanto da Astronomia continua a seduzir e fascinar não só os jovens, mas toda a população. Além da licenciatura, que forma os professores do ensino médio e fundamental, cursos de Astronomia no ensino superior são ótimas preparações para carreiras científicas e tecnológicas. Existe ainda a pesquisa em Astronomia. O objetivo dos astrônomos é utilizar o universo como laboratório, deduzindo de sua observação as leis físicas que poderão ser utilizadas em atividades muito práticas, como prever as marés, estudar a queda de asteroides sobre a Terra, entender como funcionam reatores nucleares e analisar o aquecimento da atmosfera por efeito estufa, causado pela poluição. São atividades necessárias para a sobrevivência e o desenvolvimento da espécie humana. Além disso, foram produzidos nas estrelas todos os elementos

químicos que são a base da vida. Finalmente, a Astronomia é um dos promotores do desenvolvimento de tecnologia avançada, de sensores ópticos, de raios X a ondas de rádio, de computadores velozes, de eletrônica e óptica sofisticada e mesmo de engenharia de ponta.

No Brasil, a grande maioria dos pesquisadores em Astronomia e Astrofísica fizeram bacharelado em Física, e depois a pós-graduação, mestrado e doutorado em Astronomia. A UFRJ oferece curso de graduação em Astronomia há mais de 50 anos. A USP iniciou o bacharelado específico no ano de 2009 e a UFRGS está iniciando o dela.

No âmbito da pós-graduação em Astronomia, os primeiros cursos foram dados no Instituto Tecnológico da Aeronáutica, na Universidade Mackenzie e no Instituto Astronômico e Geofísico da USP, entre 1969 e 1971. Foram seguidos pelo curso da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e, mais tarde, do Observatório Nacional, no Rio de Janeiro, da Universidade Federal de Minas Gerais e

da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Atualmente 14 programas já forneceram titulação e novos programas estão iniciando.

É importante realçar que um profissional de Astronomia só entra realmente no mercado de trabalho após obter o doutorado. Durante os últimos anos da graduação e durante toda a pós-graduação, a grande maioria dos estudantes recebe bolsa das agências financiadoras brasileiras CNPq, CAPES e FAPESP, esta última em São Paulo.

Os astrônomos profissionais trabalham nos institutos de pesquisa do Ministério de Ciência e Tecnologia: INPE, ON, LNA, CBPF e nas universidades. Uma parcela ainda pequena trabalha em empresas privadas, como Embratel, mas a grande capacitação em informática que eles aprendem tem levado alguns para a área de computação e instrumentação.

Uma das grandes deficiências no ensino de Astronomia é a falta de formação dos professores do ensino

fundamental e médio nesta área. A Astronomia é ensinada nas cadeiras de Geografia e Ciências no ensino fundamental, mas ainda são poucos os professores de Geografia que tiveram cursos de Astronomia na sua graduação. Mesmo no ensino médio, onde os parâmetros curriculares exigem vários conhecimentos de Astronomia e licenciatura em física, ainda há muitos cursos de licenciatura sem cursos específicos de Astronomia.

À falta de formação específica dos professores, soma-se a ausência de material didático em astronomia, e há muitas falhas nos livros didáticos. Iniciativas de cursos de extensão têm sido realizadas pela USP, pelo INPE e pela UFRGS, assim como cursos a distância pelo ON. Cursos específicos de mestrado profissionalizante em ensino de astronomia, a exemplo do que já ocorre na UFRGS, também seriam bem-vindos. Os Encontros de Ensino de Astronomia (EREAs e ENEAs) são um fórum importante para formular uma política de ensino de Astronomia na

Os programas de pós-graduação na Astronomia brasileira, o número de concluintes no período 2005/2007+2008 e o número de alunos matriculados em 2009.

	Nota CAPES	2005/7 Ms	2008 Ms	2005/7 Dr	2008 Dr	Alunos matri- culados em 2009 M/D
IAG-USP	7	22	10	17	6	23/42
IF-UFRGS	7	3	2	6	3	4/9
CBPF	7	3	3	3	2	4/13
DF-UFMG	7	2	-	2	2	2/6
IF-UFRJ	7	1	-	6	1	2/3
DF-UFRN	5	7	1	6	3	5/14
DF-UFSC	5	4	1	3	2	1/4
DA-ON	4	10	3	8	1	13/18
DAS-INPE	4	10	6	4	1	9/11
FEG-UNESP	4	8	2	-	1	6/5
UNIVAP	4	2	1	-	-	3/1
DF-UFMS	3	4	1	4	-	1/4
OV-UFRJ	3	5	2	-		12/0
UNIFEI	3	2	1	-		5/0
Total	-	83	30	59	24	90/130

Obs.: A UNICSUL (São Paulo), UESC (Ilhéus) e UERN (Mossoró) iniciaram os programas de pós-graduação recentemente e não formaram ninguém até 2008.

formação de professores de Ciências e na estruturação dos tópicos a serem ensinados no primeiro e segundo graus.

Astronomia amadora

O Brasil possui alguns milhares de astrônomos amadores, em quase duzentos clubes e associações regionais em todos os estados. Esses números são muito próximos aos de países da Europa Ocidental e Ásia. Suas principais atividades se agrupam em duas áreas. A mais tradicional é a da divulgação da astronomia

ao grande público, realizada pelos clubes locais e frequentemente atuando em parceria com planetários e universidades. Na última década, organizados em uma rede nacional de observação amadora (REA), os amadores têm tido também papel ativo na obtenção de dados observacionais potencialmente utilizáveis em trabalhos posteriores de pesquisa por instituições profissionais. Dezenas de asteroides, dezesseis supernovas e um cometa foram descobertos por amadores brasileiros. Desde 1998, a comunidade amadora realiza encontros nacionais anuais (ENAST),



A observação dos astros atrai pessoas de todas as idades e faixas sociais. É importante que os cidadãos de todo o país possam explorar, desde cedo, suas ligações com o Universo. (Crédito: Astronomia no Pantanal – grupo da UFMT)

sempre em cidades distintas e abertos à participação de estudantes e do público leigo. Assim como na maioria dos países desenvolvidos, a tendência de colaboração entre a comunidade amadora e a profissional tem sido incrementada nos últimos anos, notadamente com a realização do Ano Internacional da Astronomia em 2009.

Divulgação da Astronomia

A divulgação da Astronomia complementa os espaços não formais de educação. Ela se dá por meio de sessões de planetários, observações telescópicas abertas ao público, artigos em jornais, revistas e filmes em TVs. Ela atinge uma população numerosa que, em sua maior parte, não frequenta mais a escola. Essa atividade é importante por promover uma educação científica e transmitir aos cidadãos informações sobre o uso de recursos provenientes de seus impostos. Essa atividade vem crescendo constantemente no Brasil e tem sido recebida calorosa-

mente pela população e pela imprensa, com o apoio do MCT e do CNPq.

O Ano Internacional da Astronomia em 2009, coordenado pela União Astronômica Internacional (IAU), constituiu-se no maior evento de divulgação científica da história. O Brasil teve grande destaque no Ano Internacional, tendo realizado 16 mil eventos de divulgação, dos quais participaram 2,3 milhões de pessoas. Essa atividade foi conduzida por uma rede de 229 Nós Locais, distribuídos por todos os estados brasileiros, somando duas mil pessoas. Os Nós da Rede congregam astrônomos amadores (160 clubes), astrônomos profissionais, educadores e jovens amantes da ciência.

O enorme interesse despertado no público certamente resultará num aumento de demanda por informações e no engajamento de mais jovens na carreira científica. Para dar conta dessa tarefa, os Nós Locais formaram a Rede Brasileira de Astronomia (RBA), que continuará a herança do Ano Internacional da Astronomia (www.astronomia2009.org.br).

Galeria de imagens

LUA CHEIA E ECLIPSE LUNAR

DISTÂNCIA: 1,25 SEGUNDOS-LUZ DA TERRA



Por ser grande e estar próxima da Terra, a Lua exerce grande influência sobre a humanidade. As fases da Lua, as marés, a iluminação noturna e os eclipses [foto inferior] foram usados, desde a remota antiguidade, para organizar calendários, mapear espaços na Terra e no céu e testar teorias. Sua distância e tamanho já eram bem conhecidos há 2.300 anos. Um eclipse solar, observado em Sobral, no Ceará, em 1919, permitiu testar a Teoria da Relatividade Geral. Em 1969, apenas 40 anos atrás, o homem conseguiu aportar na Lua.



FOTO SUPERIOR: JEAN-LUC DAUVERGNE - FOTO INFERIOR: AKIRA FUJII/CIEL ET ESPACE

MANCHAS E ERUPÇÕES SOLARES

DISTÂNCIA: 8,3 MINUTOS-LUZ DA TERRA

O Sol é a fonte de praticamente toda a energia que circula na atmosfera terrestre, mantendo os oceanos em estado líquido, movimentando os ventos, possibilitando as chuvas e garantindo a sobrevivência dos seres vivos. Ele está na metade de sua vida [5 bilhões de anos], tendo como fonte de energia a fusão de átomos de hidrogênio em hélio. As manchas solares [foto central] são maiores que a Terra e se formam em razão dos campos magnéticos do Sol. Há 400 anos, Galileu provou que elas faziam parte do Sol e que não eram "nuvens", como se imaginava na época. O Sol é filmado 24 horas por dia para que se possa monitorar sua atividade [foto ao lado].

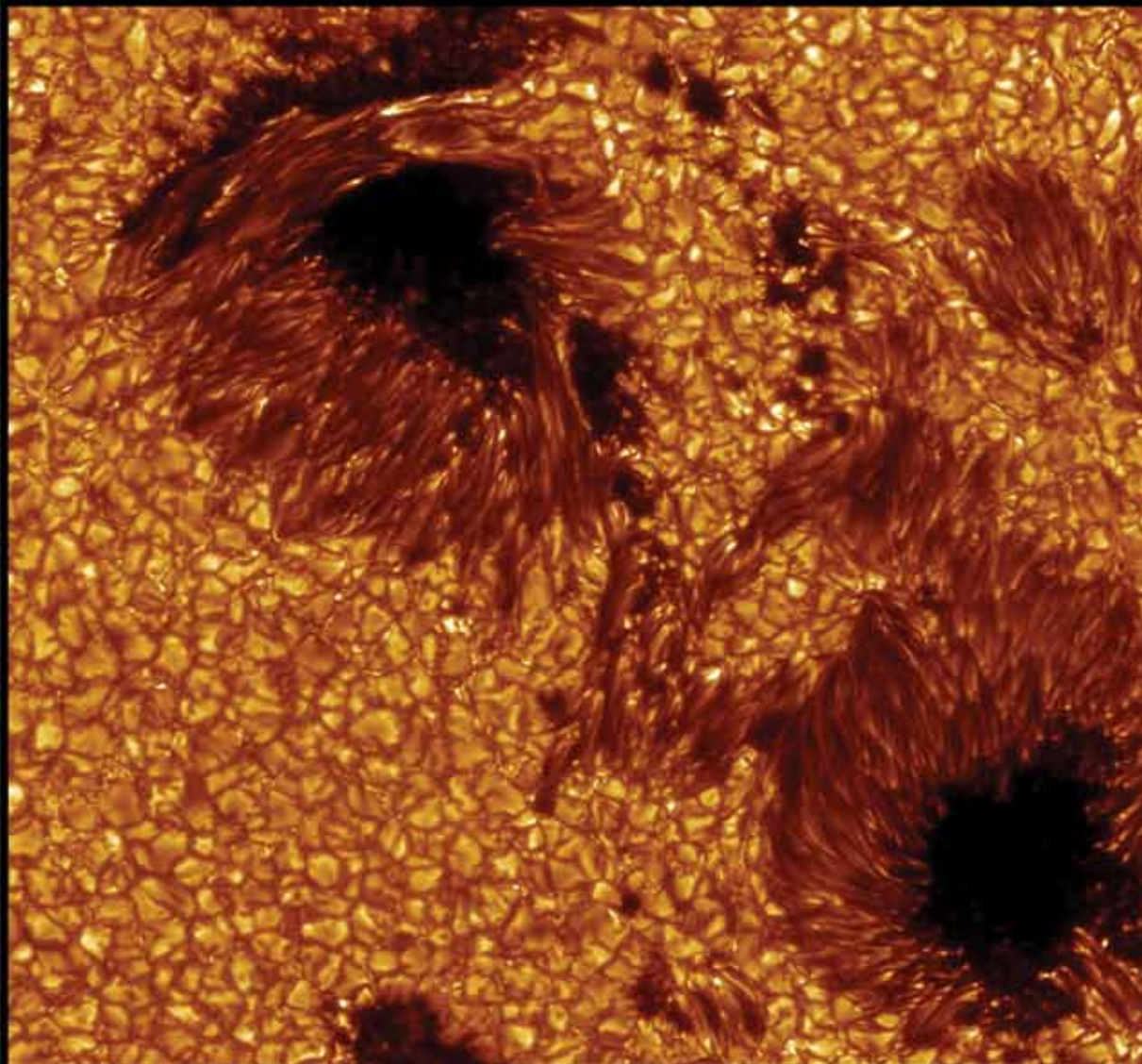


FOTO SUPERIOR [ERUPÇÃO]: SOHO (ESA+NASA) - FOTO CENTRAL [MANCHAS]: GÖRAN SCHÄRMER E KAI LANGHANS, MATS LAURIAHL, ISP E ROYAL SWEDISH ACADEMY

MORTE DE UMA PEQUENA ESTRELA

DISTÂNCIA: 3 MIL ANOS-LUZ

Estrelas pequenas, com massas parecidas com a do Sol, vivem longamente gerando energia de modo estável ao longo de bilhões de anos. Isso é muito favorável para abrigar vida. Ao se tornarem gigantes vermelhas, entram em violenta pulsação, expelindo camadas esféricas concêntricas [círculos tênues ao fundo]. Na fase final, ventos rápidos e quentes carregados de átomos de carbono e nitrogênio formam uma nebulosa planetária [nuvens em forma de S] que, neste caso [Nebulosa Olho de Gato], tem 0,4 ano-luz de diâmetro. A estrela morta [anã branca] no centro é 10 milhões de vezes mais densa que o ferro.



BERÇÁRIO DE ESTRELAS EM GALÁXIA VIZINHA

DISTÂNCIA: 180 MIL ANOS-LUZ

Este grupo de estrelas recém-nascidas [5 milhões de anos] situa-se na galáxia vizinha Pequena Nuvem de Magalhães e forma um aglomerado aberto (não ligado gravitacionalmente). A luz das jovens estrelas está dissipando a nuvem interestelar que as formou. Nesta região de 200 anos-luz de diâmetro existem estruturas um pouco mais densas que ainda resistem, formando "pilares" que apontam na direção do aglomerado central de estrelas. O aglomerado estelar menor, que aparece à esquerda, é um pouco mais evoluído, tendo já dissipado as nuvens de gás. Ao fundo, veem-se diversas galáxias a centenas de milhões de anos-luz.



FOTO: TELESCÓPIO ESPACIAL HUBBLE/STSC/NASA

GALÁXIA COM ESTRELAS EXPLODINDO

DISTÂNCIA: 12 MILHÕES DE ANOS-LUZ

M82 é uma galáxia espiral, vista aqui de perfil, constituída de estrelas [parte esverdeada] e ejetando enormes quantidades de gás quente [nuvens vermelhas e azuis] para fora de si mesma. Essas nuvens foram produzidas por inúmeras supernovas que estão explodindo em aglomerados de estrelas recém-formadas, próximo ao núcleo. A alta taxa de formação de estrelas em M82, dez vezes maior que na Via Láctea, deve-se a uma colisão que ela teve com sua vizinha M81 [não mostrada aqui] há cerca de 100 milhões de anos.

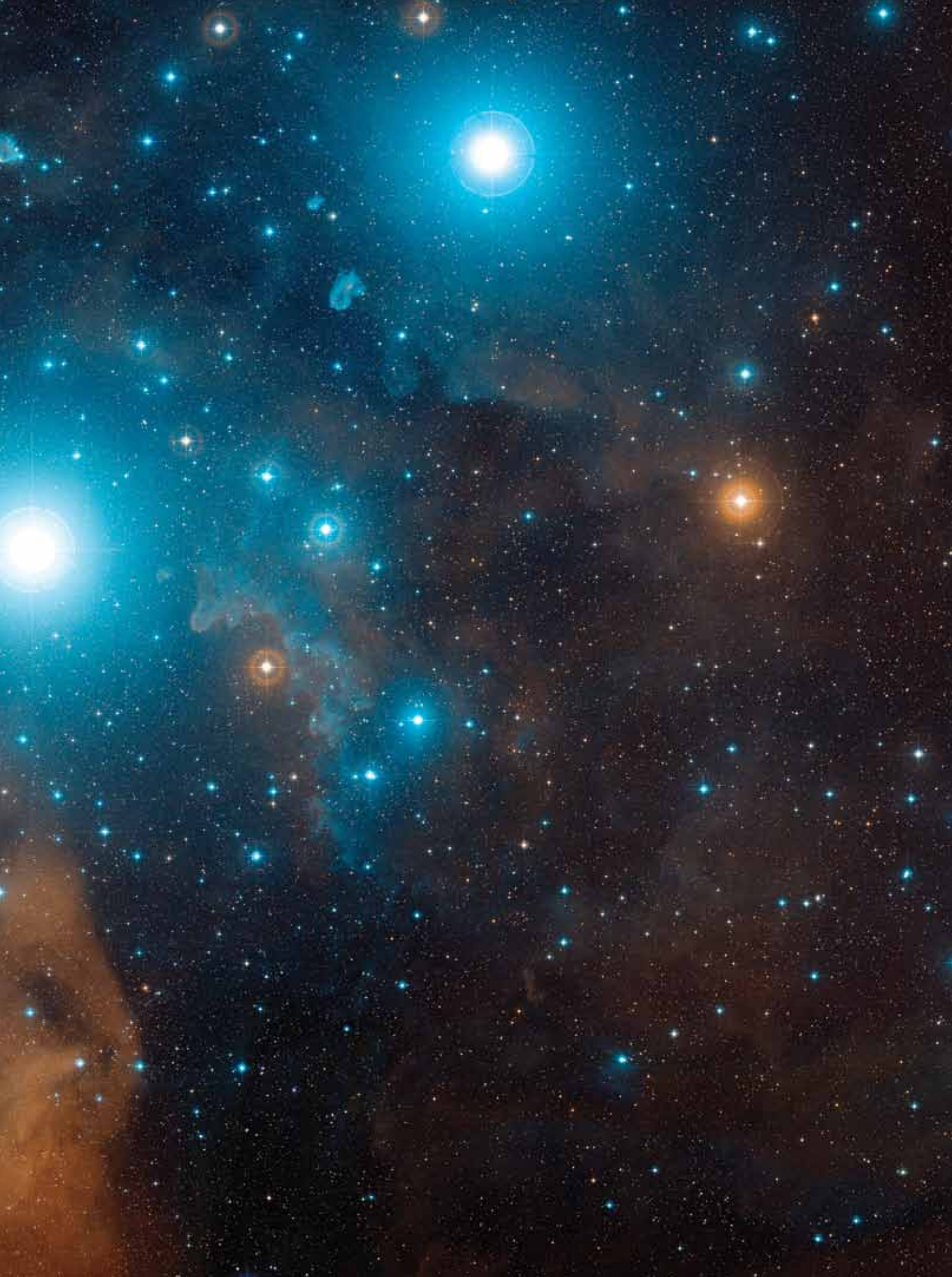


FOTO: TELESCÓPIO ESPACIAL HUBBLE/STSC/NASA



Essa obra foi impressa nas oficinas da gráfica Yangraf, com miolo em papel couché 115g, capa dura empastada em papel couché 150g, diagramada em tipologia The Sans por Vania Vieira, para Odysseus Editora no ano de 2010, com tiragem de 45.000 exemplares.





Neste livro você vai ler textos sobre pesquisas atuais em Astronomia, escritos por pesquisadores da área, refraseados em linguagem jornalística.

As informações são atualíssimas, mas a linguagem é compreensível por não iniciados.

A cobertura de temas não é e nem pode ser completa num pequeno livro, dado que a Astronomia é vastíssima. Ela representa a visão de alguns pesquisadores, formada a partir de seus postos, na fronteira da pesquisa. Ela mostra também como a área se estrutura no Brasil, em termos de empregos, formação de pessoal e atividade de divulgação. A primeira edição é de 40 mil exemplares, distribuídos gratuitamente, principalmente para escolas públicas. A Astronomia brasileira tem uma história de sucesso nos últimos 40 anos, reconhecida internacionalmente.

Graças ao apoio das agências de fomento à pesquisa, federais e estaduais, ela continuará crescendo na próxima década. Temos pouco mais de duas centenas de cientistas na área e esse número precisa aumentar bastante para o Brasil fazer jus às suas aspirações de país desenvolvido.

